

Національний університет «Одеська морська академія»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Конон Наталія Миколаївна

УДК 656.615.052.4:629.544-049.5(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ МАНЕВРУВАННЯ ВЕЛИКОТОННАЖНИХ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ У ПОРТОВИХ АКВАТОРІЯХ

Спеціальність 271 – «Морський та внутрішній водний транспорт»

Галузь знань 27 – «Транспорт»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



(підпис)

Н.М. Конон

Науковий керівник:

Піпченко Олександр Дмитрович

д-р техн. наук, доцент

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Конон Н.М. Підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – «Морський та внутрішній водний транспорт» (галузь знань 27 – Транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2024.

Сучасний запит практики вимагає підвищення безпеки судноплавства в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування надвеликих суден у портових акваторіях. Це також підкреслює необхідність враховувати сили та моменти взаємодії між судном і буксирами при плануванні та виконанні маневрів, оскільки залучення буксирів є важливою умовою для безпечного проходу великотоннажних суден у портових водах. Аналіз наявних досліджень свідчить про недостатню вивченість керованості великотоннажних контейнеровозів у контексті підвищення безпеки їх маневрування. Таким чином, виникає необхідність зниження ризиків виникнення небезпечних ситуацій, яка зумовлює визначення й обґрунтування актуальності основного напрямку дослідження, що полягає в удосконаленні процесів та засобів, спрямованих на підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях.

В межах методологічного забезпечення дисертаційного дослідження, була сформована його технологічна карта, відповідно до якої визначено запит практики, який зумовлює тему наукової праці, мету, наукову гіпотезу, а також головне завдання дослідження, що представлене трьома окремими складовими. Отриманим науковим результатам притаманна наукова новизна.

Об'єктом даного дослідження є процес маневрування великотоннажних контейнеровозів.

Предметом дослідження є безпека маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях, зокрема із використанням буксирів.

Метою даного дисертаційного дослідження є удосконалення існуючих процесів та засобів, спрямованих на підвищення ефективності і безпеки судноплавства, й зменшення впливу людського фактору, в контексті управління великотоннажними контейнеровозами в портових акваторіях.

Головне завдання дисертаційного дослідження полягає в побудові алгоритму прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі адекватних математичних моделей руху судна і буксирів, які працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування в портових акваторіях.

Для вирішення головного завдання даного дисертаційного дослідження воно було розкладено на **допоміжні задачі**, а саме:

- 1) математичне моделювання руху великотоннажного контейнеровозу та верифікація математичної моделі за даними випробувань;
- 2) математичне моделювання взаємодії судна та буксирів, з урахуванням обмежень маневреності буксирів;
- 3) побудова алгоритму прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі математичної моделі руху судна, а також розширення алгоритму для прогнозування траєкторії руху при спільному маневруванні з буксирами.

Наукова новизна отриманих результатів даного дисертаційного дослідження полягає в побудові нового алгоритму прогнозування траєкторії руху судна, зокрема при спільному маневруванні із буксирами, що базується на основі уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, що працюють у різних режимах роботи і з урахуванням обмежень їх маневреності. В роботі досягнуті наступні результати:

- **удосконалено** методику верифікації математичної моделі плоского руху судна, яка відрізняється алгоритмом застосування методів оптимізації, що

дозволяє отримувати більш надійні результати при уточненні гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за даними морських випробувань;

- **удосконалено** математичну модель взаємодії судна з буксиром, яка відрізняється врахуванням результуючих сил і моментів, коли в процесі маневрування беруть участь кілька буксирів, що працюють в різних режимах;

- **вперше** побудовано алгоритм прогнозування траєкторії руху судна, що відрізняється використанням уточнених гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за удосконаленою методикою верифікації моделі його плоского руху, а також математичної моделі взаємодії судна з буксирами, з урахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи.

Наукова гіпотеза про можливість використання математичних моделей руху судна, зокрема великотоннажного контейнеровозу, і буксирів, що працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування для прогнозування траєкторії руху судна, була підтверджена теоретичними результатами та імітаційним моделюванням.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що результати дослідження можуть бути використані при розробці суднових систем підтримки прийняття рішень, а також при навчанні, підготовці та підвищенні кваліфікації судноводіїв. Крім того, ці результати можуть бути корисними для подальших наукових досліджень і розробок у цій галузі. Отримані в даному дисертаційному дослідженні наукові результати зумовлюють його наукове положення, яке можна сформулювати наступним чином: прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі уточненої математичної моделі руху судна, а також математичної моделі взаємодії судна з декількома буксирами, з врахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи, може бути застосовано з метою підвищення ефективності і безпеки судноплавства, а також зменшення впливу людського фактору при маневруванні великотоннажних контейнеровозів у портових водах.

Результати даного дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес підготовки другого (магістерського) рівня вищої освіти у якості складової частини; використовуються у навчальному процесі кафедри судноводіння, а саме в курсі лекцій з дисципліни «Математичні основи судноводіння»; впроваджено у освітній процес в якості складової практичної частини курсів підвищення кваліфікації судноводіїв в Інституті післядипломної освіти «Центр підготовки та атестації плавскладу» Національного університету «Одеська морська академія»; впроваджено в освітню компоненту «Дослідницький практикум», відповідно до освітньо–професійної програми другого (магістерського) рівня підготовки «Навігація і управління морськими суднами» навчально–наукового інституту навігації НУОМА; відображено в звіті з науково–дослідної роботи «Підвищення навігаційної безпеки морських перевезень у територіальному морі та внутрішніх морських водах України в інтересах агропромислового комплексу» (№ ДР 0123U1047412, Розділ 7 – Розробка морського коридору у районі Дністровської банки для проходження великотоннажних суден, які виходять з портів Одеської затоки, в умовах воєнного стану); імплементовано в програмне забезпечення NavSimulator компанії Learnmarine LLC.

Ключові слова: великотоннажні контейнеровози, математична модель, гідродинамічні сили, людський фактор, навігаційна безпека, прогнозування аварій, керування судном, запобігання зіткненням суден, морський транспорт, навігаційні технології, морська освіта та підготовка, морські аварії, навігаційна ситуація, безпека маневрування.

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. N. Konon, “Analytical Modelling of Seakeeping Qualities of Container Vessel,” *Shipping & Navigation*, vol. 30, no. 1, pp. 78–87, Dec. 2020, DOI: 10.31653/2306–5761.30.2020.78–87.

2. O. Pipchenko, N. Konon and Ye. Bogachenko. "Mathematical modelling of "ASD tug – marine vessel" interaction considering tug's maneuverability and stability limitations," *Journal of Maritime Research*, vol. 20, no. 2, pp.117–124, August 2023, DOI: 10.5281/zenodo.8370780.

3. N. Konon and O. Pipchenko, "Enhancement of Ship Handling Techniques Along a Predetermined Trajectory," *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, vol. 26–27, no. 1–2, pp. 29–43, Dec. 2023, DOI: 10.33815/2313–4763.2023.1–2.26–27.029–043.

4. N. Konon and O. Pipchenko, "Analysis of Marine Accidents Involving Container Ships," *Shipping & Navigation*, vol. 32, no. 1, pp. 46–55, Dec. 2021, DOI: 10.31653/2306–5761.32.2021.46–55.

5. N. Konon, "Prospects for Modern Maritime Education and Training Practices in Terms of Distance Learning," *Shipping & Navigation*, vol. 33, no. 1, pp. 54–66, Dec. 2022, DOI: 10.31653/2306–5761.33.2022.54–66.

6. Н. Конон, В. Конон, "Аналіз ризиків притаманних контейнерному флоту у контексті підвищення безпеки морських операцій," *Shipping & Navigation*, vol. 34, no. 1, pp. 79–92, May 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.34.2023.79–92.

7. О. Піпченко, Н. Конон, "Удосконалення методів морської професійної підготовки шляхом залучення сучасних технологій," *Shipping & Navigation*, vol. 35, no. 1, pp. 128–142, Dec. 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.35.2023.128–142.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. N. Konon, O. Pipchenko and Yu. Kazak, "Virtual Reality Application and Usability in the Context of Maritime Education and Training: Assessment and Perspectives," in *Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference*, Palanga, Lithuania, October 04–06, 2023, Kaunas: Publishing House "Technologija", 2023, pp. 680–684, DOI: 10.5755/e01.2351–7034.2023.P2.

9. O. Pipchenko and N. Konon, "Involvement of modern technologies in the improvement of marine professional training methods," *Збірник матеріалів VIII*

міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення», 19–20 квітня 2024 р., ДІ НУ «ОМА», Ізмаїл, С. 329–332.

10. Н. М. Конон, “Оцінка перспектив підвищення навігаційної безпеки великотоннажних контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково-технічної конференції “Судноводіння, морські технології та перевезення” (NST-2022)*, 17–18 листопада 2022 р., НУ «ОМА», Одеса, С. 165–169.

11. N. Konon, “Multi-vessel operation in maritime education and training,” in *Conference booklet “The green line of maritime business”*, Lithuanian Maritime Academy, Klaipeda, 14–16 September 2022, p. 14.

12. Н. М. Конон, “Аналіз аварійності контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково-практичної конференції “Проблеми сталого розвитку морської галузі PSDMI-2021”*, 3–5 листопада 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 45 – 48.

13. Н. М. Конон, “Контроль навігаційної безпеки при проходженні Суецького каналу на прикладі аварії т/х «Ever Given»,” *Збірник матеріалів XIII міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті” (MINTT – 2021)*, 25–27 травня 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 118–121.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

14. Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами : пат. 157309 Україна : (2023.01) G01C 21/00, (2006.01) B63B 49/00. № u 2023 00148 ; заявл. 16.01.2023; опубл. 02.10.2024, Бюл. № 40/2024 (кн. 1). 170 с.

ABSTRACT

Konon N.M. Enhancing the safety of manoeuvring large-tonnage container ships in port waters. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the Doctor of Philosophy by the specialty 271 – «Sea and inland water transport» (branch of knowledge 27 – Transport). – National University "Odesa Maritime Academy", Odesa, 2024.

Contemporary practices necessitate enhanced navigational safety in port areas, where the effective independent manoeuvring of very large vessels is limited. This also emphasizes the necessity of considering the interaction forces and moments between the vessel and tugboats when planning and executing manoeuvres, as the involvement of tugboats is a crucial condition for the safe passage of large vessels in port waters. The analysis of existing studies shows that the controllability of large-tonnage container ships is insufficiently studied in the context of increasing the safety of their manoeuvring. Thus, a need to manage the risks of hazardous situations arises. This necessitates the identification and justification of the relevance of the main research direction, which focuses on improving the processes and means aimed at enhancing the safety of manoeuvring large-tonnage container ships in port waters. Within the methodological framework of the dissertation research, a research roadmap was formed, according to which the practical demand that determines the topic of the scientific work, the goal, the scientific hypothesis, and the main task of the research, presented in three separate components, were defined. The obtained results are characterized by scientific novelty.

The object of this research is the process of manoeuvring large-tonnage container ships.

The subject of the research is the safety of manoeuvring large-tonnage container ships in port waters, particularly with the use of tugboats.

The purpose of this dissertation research is to improve existing processes and means aimed at enhancing the efficiency and safety of navigation, and reducing the

impact of the human factor, in the context of ship handling large-tonnage container ships in port waters.

The main objective of this dissertation research is to develop an algorithm for predicting the trajectory of a large-tonnage container ship based on adequate mathematical models of the ship's movement and tugboats operating in different modes, taking into account their manoeuvrability limitations, in the context of joint manoeuvring in port waters.

To solve the main task of this dissertation research, it was decomposed into the **auxiliary objectives**, namely:

- 1) Develop a mathematical model of large-tonnage container ship's movement and verify the model based on trial data;
- 2) Develop a ship-tugs interaction model considering tugs' manoeuvrability limitations;
- 3) Develop an algorithm for predicting the trajectory of a large-tonnage container ship based on the mathematical model of the ship's movement, and extending the algorithm to predict the trajectory during joint manoeuvring with tugboats.

The scientific novelty of the results obtained in this dissertation research lies in the development of a new algorithm for predicting the trajectory of a large-tonnage container ship, particularly during joint manoeuvring with tugboats, based on a refined mathematical model of the ship's movement and a mathematical model of the interaction between the ship and tugboats operating in different modes, taking into account their manoeuvrability limitations. The following results have been achieved in this work:

- an **improved** methodology for verifying the mathematical model of the planar motion of the ship, distinguished by an algorithm for applying optimization methods, which allows for more reliable results when refining the hydrodynamic coefficients of the ship's movement mathematical model based on sea trial data;
- an **improved** mathematical model of the interaction between the ship and tugboats, distinguished by considering the resultant forces and moments when multiple tugboats operating in different modes participate in the manoeuvring process;

- **for the first time**, an algorithm for predicting the ship's trajectory has been developed, distinguished by the use of a refined mathematical model of the ship's movement and a mathematical model of the interaction between the ship and tugboats, taking into account the manoeuvrability limitations of the tugboats operating in different modes.

The **hypothesis** regarding the possibility of using mathematical models of the ship's movement, particularly a large-tonnage container ship, and tugboats operating in different modes, taking into account their manoeuvrability limitations, in the context of joint manoeuvring to predict the ship's trajectory, has been confirmed by theoretical results and simulation modelling.

The **practical significance** of the obtained results lies in their potential application in the development of ship decision support systems, as well as in the training, preparation, and professional development of navigators. Additionally, these results may be useful for subsequent scientific research and development in this field. The results obtained in this dissertation research determine its **scientific position**, formulated as follows: enhancing the efficiency and safety of navigation, as well as minimizing the influence of the human factor during the manoeuvring of large-tonnage vessels in port waters, can be effectively achieved through the prediction of the trajectory of a large-tonnage container ship based on a refined mathematical model of the vessel's movement and a mathematical model of the ship-tugs interaction, taking into account the manoeuvrability limitations of tugboats operating in different modes.

The results of this dissertation research have been implemented in the educational process of the second (master's) level of higher education as a component; they are used in the educational process of the Department of Navigation, in the lecture course on "Mathematical Foundations of Navigation"; they have been implemented in the educational process as a component of the practical part of the professional development courses for navigators at the Institute of Postgraduate Education "Training and Certification Center for Seafarers" of the National University "Odessa Maritime Academy"; they have been implemented in the educational component "Research practicum" in accordance with the educational and professional program of

the second (master's) level of training " Navigation and ship handling; they are reflected in the research report "Enhancing the Navigational Safety of Maritime Transport in the Territorial Sea and Internal Waters of Ukraine in the Interests of the Agro–Industrial Complex" (No. DR 0123U1047412, Section 7 – Development of a Maritime Corridor in the Area of the Dniester Bank for the Passage of Large Vessels Departing from the Ports of the Odessa Bay under Martial Law Conditions); they have been implemented into the NavSimulator software of the Learnmarine LLC.

Keywords: ultra large container ships (ULCS), mathematical model, hydrodynamic forces, human factor, navigation safety, accident prediction, vessel control, prevention of vessels collisions, maritime transport, navigation technologies, crew training and education, maritime accidents, navigation situation, maneuvering safety.

List of publications in which the main scientific results of the dissertation were published:

1. N. Konon, “Analytical Modelling of Seakeeping Qualities of Container Vessel,” *Shipping & Navigation*, vol. 30, no. 1, pp. 78–87, Dec. 2020, DOI: 10.31653/2306–5761.30.2020.78–87.
2. O. Pipchenko, N. Konon and Ye. Bogachenko. “Mathematical modelling of "ASD tug – marine vessel" interaction considering tug's maneuverability and stability limitations,” *Journal of Maritime Research*, vol. 20, no. 2, pp.117–124, August 2023, DOI: 10.5281/zenodo.8370780.
3. N. Konon and O. Pipchenko, “Enhancement of Ship Handling Techniques Along a Predetermined Trajectory,” *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, vol. 26–27, no. 1–2, pp. 29–43, Dec. 2023, DOI: 10.33815/2313–4763.2023.1–2.26–27.029–043.
4. N. Konon and O. Pipchenko, “Analysis of Marine Accidents Involving Container Ships,” *Shipping & Navigation*, vol. 32, no. 1, pp. 46–55, Dec. 2021, DOI: 10.31653/2306–5761.32.2021.46–55.

5. N. Konon, “Prospects for Modern Maritime Education and Training Practices in Terms of Distance Learning,” *Shipping & Navigation*, vol. 33, no. 1, pp. 54–66, Dec. 2022, DOI: 10.31653/2306–5761.33.2022.54–66.

6. N. Konon and V. Konon, “Risk analysis of the container fleet in the context of the maritime operations’ safety improvement,” *Shipping & Navigation*, vol. 34, no. 1, pp. 79–92, May 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.34.2023.79–92.

7. O. Pipchenko and N. Konon, “Improvement of marine professional training methods through the involvement of modern technologies,” *Shipping & Navigation*, vol. 35, no. 1, pp. 128–142, Dec. 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.35.2023.128–142.

List of publications that witness the approbation of the dissertation materials:

8. N. Konon, O. Pipchenko and Yu. Kazak, “Virtual Reality Application and Usability in the Context of Maritime Education and Training: Assessment and Perspectives,” in *Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference*, Palanga, Lithuania, October 04–06, 2023, Kaunas: Publishing House "Technologija", 2023, pp. 680–684, DOI: 10.5755/e01.2351–7034.2023.P2.

9. O. Pipchenko and N. Konon, “Involvement of modern technologies in the improvement of marine professional training methods,” *Збірник матеріалів VIII міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення»*, 19–20 квітня 2024 р., ДІ НУ «ОМА», Ізмаїл, С. 329–332.

10. Н. М. Конон, “Оцінка перспектив підвищення навігаційної безпеки великотоннажних контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково-технічної конференції “Судноводіння, морські технології та перевезення” (NST–2022)*, 17–18 листопада 2022 р., НУ «ОМА», Одеса, С. 165–169.

11. N. Konon, “Multi-vessel operation in maritime education and training,” in *Conference booklet “The green line of maritime business”*, Lithuanian Maritime Academy, Klaipeda, 14–16 September 2022, p. 14.

12. Н. М. Конон, “Аналіз аварійності контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково-практичної конференції “Проблеми сталого розвитку морської галузі PSDMI–2021”*, 3–5 листопада 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 45 – 48.

13. Н. М. Конон, “Контроль навігаційної безпеки при проходженні Суецького каналу на прикладі аварії т/х «Ever Given»,” *Збірник матеріалів XIII міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті” (MINTT – 2021)*, 25–27 травня 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 118–121.

**List of publications that additionally reflect the scientific results of the
dissertation:**

14. Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами : пат. 157309 Україна : (2023.01) G01C 21/00, (2006.01) B63B 49/00. № и 2023 00148 ; заявл. 16.01.2023; опубл. 02.10.2024, Бюл. № 40/2024 (кн. 1). 170 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ МАНЕВРУВАННЯ ВЕЛИКОТОННАЖНИХ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ	30
1.1 Стислий аналіз аварійності та поширених проблем безпеки маневрування контейнеровозів.....	30
1.2 Огляд сучасних підходів щодо оцінки маневрування судна.....	34
1.3 Огляд методів дослідження зовнішніх збурень на судно та морські спороди.....	45
1.4 Висновки до першого розділу.....	52
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	53
2.1 Вибір та обґрунтування напрямку дисертаційного дослідження	53
2.2 Формування технологічної карти наукового дослідження.....	56
2.3 Методика виконання дисертаційного дослідження	60
2.4 Висновки до другого розділу	62
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ КОНТЕЙНЕРНОГО СУДНА.....	64
3.1 Аналітичне моделювання плоского руху судна	64
3.2 Визначення гідродинамічних коефіцієнтів моделі та їх уточнення за параметрами типових ходових маневрів	69
3.3 Математичне моделювання взаємодії «Буксири ASD – контейнеровоз ULCS».....	81
3.4 Імітаційне моделювання взаємодії буксирів ASD та великотоннажного контейнеровозу.....	89

3.5 Висновки до третього розділу	96
РОЗДІЛ 4. ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ СУДНА.....	97
4.1 Сучасні методи прогнозування траєкторії руху суден.....	97
4.2 Побудова алгоритму прогнозування траєкторії на основі математичної моделі руху судна.....	102
4.3 Побудова алгоритму прогнозування траєкторії на основі математичної моделі взаємодії судна з буксирами	109
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	116
РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ МАНЕВРУВАННЯ З ПРОГНОЗУВАННЯМ ТРАЄКТОРІЇ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ СУДНА І БУКСИРА	118
5.1 Моделювання маневрування великотоннажного контейнеровоза у режимі реального часу	118
5.2 Моделювання маневрування великотоннажного контейнеровоза з буксирами в режимі реального часу з прогнозуванням траєкторії.....	126
5.3 Прогнозування траєкторії судна в контексті суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами	142
5.4 Врахування взаємодії судна з буксирами при маневруванні та прогнозування траєкторії судна в контексті розвитку сучасних підходів до морської освіти та підготовки.....	145
5.5 Висновки до п'ятого розділу	152
ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	160
ДОДАТОК А Характеристики великотоннажного контейнеровозу	177
ДОДАТОК Б Характеристики буксиру ASD	179

ДОДАТОК В Акти впровадження результатів	182
ДОДАТОК Г Патент на корисну модель	187
ДОДАТОК Д Список публікацій здобувачки та відомості	197

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення економічної вигідності рейсу вимагає від торговельного флоту перевезення максимально можливої кількості вантажу за мінімально можливий проміжок часу. За останнє десятиліття контейнерні судна підтвердили свою значну роль на міжнародному ринку світової логістики, оскільки міжнародна торгівля, в своїй більшості, забезпечується морськими контейнерними перевезеннями [18], що сприяє зростанню попиту саме на цей вид вантажних перевезень. В цьому контексті слід відзначити, що з 2014 року розпочалась епоха контейнеровозів типу Ultra Large Container Ship (ULCS) місткістю до 20000–24000 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit). Наприклад, контейнеровоз «Ever Act» спущений на воду у 2021 році в Південній Кореї став уже другим судном у серії з 11 ULCS із заявленою місткістю 23 992 TEU, довжиною 400 метрів, шириною 62 метрів, а осадкою 16,5 метрів. Іншим прикладом є контейнеровоз 2023 року “MSC Irina” з заявленою максимальною місткістю 24 346 TEU.

Для великотоннажних контейнеровозів до найбільш складних етапів переходу можна віднести як безпосередньо маневрування у стислих водах, підхід до причалу, так і виконання безпечних швартовних операцій. Оскільки не всі порти належним чином обладнані для розміщення та обробки суден цього типу, не завжди можливо забезпечити безпечні умови експлуатації. Наприклад, збільшення кількості контейнерів, розміщених на палубі, збільшує площу вітрильності судна, що призводить до більшого опору повітря. Як наслідок, під час вантажних операцій в окремих регіонах виникають пориви бокового вітру, які спричиняють віджимання судна від причалу, що підвищує ризики навігаційних інцидентів.

«Навігаційний інцидент – це незапланована послідовність подій та / або умов, які призводять до збитків або могли б спричинити їх, пов’язана з: зіткненням суден, посадкою на мілину, пошкодженням судна чи вантажу внаслідок дії погодних умов, чи інша подібна ситуація пов’язана з управлінням

рухом судна» [153]. Для оцінки маневреності великотоннажних контейнеровозів необхідні точні методи моделювання умов маневрування як у відкритому морі, так і в портових водах, а також під час швартовних операцій. У портових водах буксири використовуються для підвищення ефективності маневрування великими суднами, і їхнє використання також є серйозною проблемою з точки зору навігаційної безпеки. Остійність буксирів значною мірою залежить від управління буксируваним судном і вимагає від судноводіїв необхідних знань щодо особливості маневрування буксира при взаємодії з судном.

Згідно з результатами статистичних досліджень [51] та [119], розвиток аварійних ситуацій на морі на 88,9% спричинені людським фактором. Інше дослідження [32] зосереджено на впливі людського фактора з поділом на категорії, маючи на меті виявлення найпоширеніших категорій людських помилок та встановлення їх взаємозв'язку. Результати наведеної праці підтвердили, що людський фактор суттєво впливає на тенденцію до виникнення морських аварій.

У дослідженні [60] аналізуються методи прогнозування характеристик маневрування судна за допомогою систематичного огляду на основі набору вказівок PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Рекомендації PRISMA спрямовані на забезпечення того, щоб систематичні огляди проводилися та звітувалися таким чином, щоб вони могли повторювати та критично оцінювати їх іншими дослідниками. Платформа PRISMA містить контрольний список і блок-схему для керівництва процесом звітування. Контрольний список охоплює різні аспекти перевірки, такі як обґрунтування, цілі, критерії прийнятності, джерела інформації, стратегія пошуку, вибір дослідження, процес збору даних і методи оцінки ризику упередженості. Робота підкреслює важливість розуміння гідродинамічних сил, таких як ефект банки та просідання, які значно впливають на маневреність великих суден у вузьких каналах. Дослідження вказує на потенційні майбутні виклики в галузі гідродинаміки суден, особливо зі збільшенням розмірів суден.

Автори підкреслюють необхідність постійного вдосконалення методів прогнозування, щоб йти в ногу з мінливими потребами судноплавної галузі. З одного боку дане дослідження надає всебічний огляд методів прогнозування з використанням системного підходу, а також детальний аналіз гідродинамічних сил. З іншого боку, робота обмежується умовами мілководдя і стислими водами та може не повністю відповідати умовам відкритого моря.

Робота [135] представляє концепцію конструктивних спойлерів для сучасних великих суден для підвищення маневреності. Дослідження використовує методи обчислювальної гідродинаміки CFD (Computational Fluid Dynamics) для розрахунку гідродинамічних сил у перехідному стані під час маневрів для уникнення зіткнень. Автори використовують модель контейнеровозу KRISO, оснащену спойлерами, щоб оцінити їхню ефективність у покращенні маневреності. Дослідження демонструє, що ребра спойлера значно покращують характеристики великих кораблів щодо зміни курсу. Ребра створюють додаткову підйомну силу та зменшують гідродинамічний опір, покращуючи маневреність судна. Дослідження підкреслює потенціал спойлерів для покращення можливостей запобігання зіткненням, особливо в складних дорожніх умовах. Покращена маневреність знижує ризик зіткнень і підвищує навігаційну безпеку. До сильних сторін даного дослідження можна віднести інноваційну концепцію спойлерів та використання методів CFD для більш точних розрахунків гідродинамічної сили. До слабких сторін можна віднести обмеженість на уникненні зіткнень та може не охоплювати інші сценарії маневрування.

У дослідженні [101] розглядаються обмеження існуючих систем швартування, коли великотоннажні контейнеровози піддаються впливу вітру та сил, що проходять повз кораблі, пропонуються заходи пом'якшення наслідків та досліджуються інноваційні технології швартування. Автори використовують динамічний аналіз швартування, щоб оцінити продуктивність швартування гіпотетичного майбутнього контейнеровоза місткістю 40 000 TEU. Дослідження

порівнює характеристики швартування майбутнього ULCS з Emma Maersk, яке регулярно заходить до контейнерних терміналів. Аналіз враховує вплив вітру та сил, що проходять повз судна, на швартову систему. Дослідження вивчає потенціал нових технологій швартування, таких як високоміцні синтетичні мотузки та розумні системи швартування, для вирішення проблем, пов'язаних з ULCS. Ці технології пропонують покращену міцність і гнучкість, підвищуючи безпеку та ефективність швартовних операцій. Дослідження включає тематичне дослідження контейнерного терміналу в порту Роттердам, найбільшому морському порту Європи. Аналіз підкреслює необхідність враховувати як вітер, так і вплив пропливаючих суден на пришвартовані судна, щоб забезпечити безпечну та ефективну роботу порту. Сильними сторонами даного дослідження є усунення обмежень поточних систем швартування та запропоновані інноваційні технології швартування. Слабкими сторонами є обмеженість дослідження тільки одним типом суден.

У статті [121] обговорюються гідродинамічні характеристики великих контейнеровозів у замкнутих водах, наголошується на необхідності точних методів прогнозування для забезпечення безпечної навігації. Автори використовують комбінацію експериментальних і обчислювальних методів для дослідження гідродинамічних характеристик великих контейнеровозів. Дослідження використовує експериментальну гідродинаміку EFD: експерименти з буксирними цистернами для вимірювання гідродинамічних сил, що діють на масштабовану модель великого контейнеровоза. Ці експерименти призначені для повторення реальних умов і отримання точних даних про гідродинамічні характеристики корабля. Автори використовують моделювання CFD для моделювання потоку навколо судна та прогнозування результируючих гідродинамічних сил і моментів. Результати показують, що гідродинамічні сили та моменти значно впливають на маневреність великих контейнеровозів у закритих водах. Такі фактори, як глибина води, ширина каналу та швидкість судна, відіграють вирішальну роль у визначенні реакції судна на стерно. Умови

мілководдя можуть призвести до збільшення опору та зниження маневреності, що робить важливим точно передбачити ці ефекти для безпечної навігації.

Робота [75] зосереджена на впливі сил вітру на маневреність великих контейнеровозів, особливо під час портових операцій. Автори використовують комбінацію експериментальних і чисельних методів для аналізу впливу сил вітру на великі контейнеровози. Дослідження використовує експерименти в аеродинамічній трубі для вимірювання сил вітру, що діють на масштабовану модель великого контейнеровоза. Ці експерименти призначені для відтворення реальних умов і надання точних даних про аеродинамічні сили та моменти, які відчуває корабель. Автори використовують моделювання CFD для моделювання вітрового потоку навколо судна та прогнозування результуючих сил і моментів. Результати показують, що сили та моменти вітру значно впливають на маневреність великих контейнеровозів. Величина цих сил залежить від таких факторів, як конфігурація контейнера на палубі, швидкість судна та напрямок вітру. Результати підкреслюють важливість врахування вітрових сил при плануванні та виконанні портових операцій. Автори припускають, що передові інструменти моделювання можуть бути інтегровані в системи підтримки прийняття рішень для підвищення безпеки та ефективності маневрування великих контейнеровозів у портових водах.

Статистичні дані аналітичних досліджень причин аварійності контейнеровозів демонструють домінування недостатньої ситуаційної обізнаності (situational awareness) серед плавскладу [47]. Відповідно до цього, з метою уникнення розвитку надзвичайних ситуацій, необхідно висунути чіткі умови забезпечення ситуаційної обізнаності для конкретних суден та умов плавання.

Судна з великою площею вітрильності вирізняються схильністю до погіршення або втрати маневреності за умов відносно великих швидкостей вітру при відносно малих швидкостях руху судна. Наявні на судні дані про маневрені характеристики не дають можливості оперативної та достатньої оцінки наслідків

дії зовнішніх збурень для завчасного прийняття правильного навігаційного рішення з точки зору безпеки судноводіння.

Сучасний запит практики вимагає підвищення безпеки судноплавства в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування надвеликих суден у портових акваторіях. Це також підкреслює необхідність враховувати сили та моменти взаємодії між судном і буксирами при плануванні та виконанні маневрів, оскільки залучення буксирів є важливою умовою для безпечного проходу великотоннажних суден у портових водах. Аналіз наявних досліджень свідчить про недостатню вивченість керованості великотоннажних контейнеровозів у контексті підвищення безпеки їх маневрування. Таким чином, виникає необхідність зниження ризиків виникнення небезпечних ситуацій, яка зумовлює визначення й **обґрунтування актуальності** основного напрямку дослідження, що полягає в удосконаленні процесів та засобів, спрямованих на підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дане дисертаційне дослідження було проведено у відповідності з положеннями Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р із змінами, внесеними згідно з постановою КМ України від 28.04.2023 № 416), Указу Президента України №722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», а також в рамках планів наукових досліджень Національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Підвищення навігаційної безпеки морських перевезень у територіальному морі та внутрішніх морських водах України в інтересах агропромислового комплексу» (№ ДР 0123U1047412), в якій здобувачкою було виконано окремий підрозділ.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дисертаційного дослідження є удосконалення існуючих процесів та засобів, спрямованих на підвищення

ефективності і безпеки судноплавства, й зменшення впливу людського фактору, в контексті управління великотоннажними контейнеровозами в портових акваторіях.

У відповідності до мети сформульована **наукова гіпотеза** як можливість використання математичних моделей руху судна, зокрема великотоннажного контейнеровозу, і буксирів, що працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування для прогнозування траєкторії руху судна.

Об'єктом даного дослідження є процес маневрування великотоннажних контейнеровозів.

Предметом дослідження є безпека маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях, зокрема із використанням буксирів.

Головне завдання дисертаційного дослідження полягає в побудові алгоритму прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі адекватних математичних моделей руху судна і буксирів, які працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування в портових акваторіях.

Для вирішення головного завдання, дане дисертаційне дослідження було розділено на **допоміжні задачі**, а саме:

- 1) математичне моделювання руху великотоннажного контейнеровозу та верифікація математичної моделі за даними випробувань;
- 2) математичне моделювання взаємодії судна та буксирів, з врахуванням обмежень маневреності буксирів;
- 3) побудова алгоритму прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі математичної моделі руху судна, а також розширення алгоритму для прогнозування траєкторії руху при спільному маневруванні з буксирами.

Для вирішення першого допоміжного завдання необхідно обрати великотоннажний контейнеровоз, характеристики якого відповідають вимогам

даного дисертаційного дослідження та з існуючими наявними результатами випробувань. Базуючись на існуючих математичних моделях руху судна на площині, необхідно описати відповідну математичну модель і за емпіричними формулами розрахувати гідродинамічні коефіцієнти судна. Надалі розраховані коефіцієнти повинні бути уточнені за допомогою алгоритмів оптимізації на основі даних випробувань.

Для вирішення другого допоміжного завдання необхідно описати математичну модель руху буксира на площині з урахуванням бортових коливань, формалізувати результуючі штовхальні та тягові сили буксирування, описати математичну модель взаємодії між судном і буксирами з урахуванням результуючих сил буксирування та провести відповідне імітаційне моделювання.

Для вирішення третього допоміжного завдання необхідно розробити алгоритм прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі отриманої уточненої математичної моделі руху судна. Цей алгоритм повинен враховувати змінні вхідні параметри судна та буксирів для розрахунку прогнозованого положення. Використовуючи описану математичну модель взаємодії судна та буксирів, алгоритм має бути розширений для прогнозування траєкторії при спільному маневруванні з буксирами, що працюють у різних режимах роботи.

Методи дослідження:

1) Здійснення інформаційного пошуку в рамках даного дослідження, проведення аналізу джерел, встановлення його напрямку й теми було виконано методом дедукції.

2) Відповідно до методів системного підходу, було виконано декомпозицію головного завдання дослідження на окремі складові елементи, а також було забезпечено методологічне обґрунтування дисертаційного дослідження.

3) Вирішення першого допоміжного завдання забезпечується вибором математичної моделі плоского руху судна на основі аналізу існуючих

математичних моделей і подальшого уточнення гідродинамічних коефіцієнтів базуючись на методиці верифікації математичної моделі судна за даними випробувань.

4) Вирішення другого допоміжного завдання забезпечується шляхом математичного моделювання руху буксира на площині з урахуванням бортових коливань, на основі існуючих моделей і подальшої формалізації результуючих сил таких режимів роботи буксира, як штовхання та тягання для їх урахування в математичній моделі взаємодії судна з буксирами.

5) Вирішення третього допоміжного завдання реалізується шляхом алгоритмізації отриманих математичних моделей руху судна та буксирів у контексті прогнозування траєкторії судна, що передбачає використання змінних вхідних даних в процесі маневрування судна і буксирів.

6) Верифікацію отриманих результатів виконано методом імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів даного дисертаційного дослідження полягає в побудові нового алгоритму прогнозування траєкторії руху судна, зокрема при спільному маневруванні із буксирами, що базується на основі уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, що працюють у різних режимах роботи і з урахуванням обмежень їх маневреності. В роботі досягнуті наступні результати:

- **удосконалено** методику верифікації математичної моделі плоского руху судна, яка відрізняється алгоритмом застосування методів оптимізації, що дозволяє отримувати більш надійні результати при уточненні гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за даними морських випробувань;

- **удосконалено** математичну модель взаємодії судна з буксиром, яка відрізняється врахуванням результуючих сил і моментів, коли в процесі маневрування беруть участь кілька буксирів, що працюють в різних режимах;

- **вперше** побудовано алгоритм прогнозування траєкторії руху судна, що відрізняється використанням уточнених гідродинамічних коефіцієнтів

математичної моделі руху судна за удосконаленою методикою верифікації моделі його плоского руху, а також математичної моделі взаємодії судна з буксирами, з урахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що результати дослідження можуть бути використані при розробці судових систем підтримки прийняття рішень, а також при навчанні, підготовці та підвищенні кваліфікації судноводіїв. Крім того, ці результати можуть бути корисними для подальших наукових досліджень і розробок у цій галузі. Отримані в даному дисертаційному дослідженні наукові результати зумовлюють його наукове положення, яке можна сформулювати наступним чином: прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі уточненої математичної моделі руху судна, а також математичної моделі взаємодії судна з декількома буксирами, з врахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи, може бути застосовано з метою підвищення ефективності і безпеки судноплавства, а також зменшення впливу людського фактору при маневруванні великотоннажних контейнеровозів у портових водах.

Результати даного дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес підготовки другого (магістерського) рівня вищої освіти у якості складової частини; використовуються у навчальному процесі кафедри судноводіння, а саме в курсі лекцій з дисципліни «Математичні основи судноводіння»; впроваджено у освітній процес в якості складової практичної частини курсів підвищення кваліфікації судноводіїв в Інституті післядипломної освіти «Центр підготовки та атестації плавскладу» Національного університету «Одеська морська академія»; впроваджено в освітню компоненту «Дослідницький практикум», відповідно до освітньо-професійної програми другого (магістерського) рівня підготовки «Навігація і управління морськими суднами» навчально-наукового інституту навігації НУОМА. Результати також відображені в звіті з науково-дослідної роботи «Підвищення навігаційної безпеки морських перевезень у

територіальному морі та внутрішніх морських водах України в інтересах агропромислового комплексу» (№ ДР 0123U1047412, Розділ 7 – Розробка морського коридору у районі Дністровської банки для проходження великотоннажних суден, які виходять з портів Одеської затоки, в умовах воєнного стану). Результати також імплементовано в програмне забезпечення NavSimulator компанії Learnmarine LLC.

Особистий внесок здобувачки: дисертаційна робота виконана здобувачкою самостійно. Здобувачкою було проведено інформаційний пошук й аналіз літературних джерел; забезпечено методологічне обґрунтування дисертаційного дослідження; підібрано великотоннажний контейнеровоз, характеристики якого відповідають вимогам даного дисертаційного дослідження та з існуючими наявними результатами випробувань; описано математичну модель плоского руху судна; розраховано гідродинамічні коефіцієнти судна та проведено їх уточнення за допомогою алгоритмів оптимізації на основі даних випробувань; описано математичну модель руху буксира на площині з урахуванням бортових коливань; формалізовано результуючі штовхальні та тягові сили буксирування; описано математичну модель взаємодії між судном і буксирами з урахуванням результуючих сил буксирування; розроблено алгоритм прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі отриманої уточненої математичної моделі руху судна; розширено отриманий алгоритм для прогнозування траєкторії при спільному маневруванні з буксирами, що працюють у різних режимах роботи; виконано імітаційне моделювання з метою верифікації отриманих результатів.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 14 наукових праць, зокрема: у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії – 6; у закордонних наукових фахових виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus – 2; у збірниках матеріалів наукових конференцій –

5; патентів – 1. Наукові праці [42]–[44], [144]–[146] опубліковані одноосібно. У даному дослідженні, з наукових праць, що були опубліковані у співавторстві, використано виключно ті положення, що належать автору особисто, зокрема: [45] – визначення поширених ризиків на контейнерному флоті та шляхи їх зниження з точки зору навігаційної безпеки судноплавства; [47] – аналіз морських аварій на контейнерному флоті, їх класифікація за типом, а також виділення та розподілення первинних і вторинних причин їх виникнення; [48] – аналіз інформаційних джерел, визначення взаємозв'язків між заданим шляхом судна й динамічними параметрами, що використовуються для контролю слідування траєкторії судном; [49] – дослідження та систематизація результатів опитувань щодо ефективності сучасних технологій в контексті підвищення якості морської освіти та підготовки; [88] – оцінка ефективності застосування розширеної реальності та симуляції в контексті підвищення безпеки експлуатації морського транспорту, концепція моделі мультистанційного навчання для підготовки судноводіїв; [89] – комплексна оцінка ефективності застосування сучасного моделювання в галузі морської освіти та підготовки в контексті підвищення безпеки судноплавства; [90] – формалізація результуючих сил буксирування при спільному маневруванні з буксирами, що працюють у різних режимах роботи, із урахуванням обмежень їх маневреності; [147] – модель суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами.

Апробація результатів дисертації. Основні результати та положення дисертаційного дослідження доповідались, обговорювалися, були схвалені на ряді конференцій:

- Науково-технічній конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT – 2021” (ХДМА, Херсон, 25–27 травня 2021 р.);
- Науково-технічній конференції “Проблеми сталого розвитку морської галузі PSDMI–2021” (ХДМА, Херсон, 3–5 листопада 2021 р.);

- International Scientific Conference “The green line of maritime business” (Lithuanian Maritime Academy, Klaipeda, 14–16 September 2022);
- Науково-технічній конференції “Судноводіння, морські технології та перевезення NST-2022” (Одеса, 17–18 листопада 2022 р.);
- 27th International Scientific Conference Transport Means 2023 (Palanga, Lithuania, October 04–06, 2023);
- Міжнародній науково-практичній конференції “Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення” (Ізмаїл, 19–20 квітня 2024 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 14 наукових праць (з них 6 одноосібно), зокрема: у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії – 6; у закордонних наукових фахових виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus – 2; у збірниках матеріалів наукових конференцій – 5; патентів – 1.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел й додатків. Загальний обсяг роботи складає 200 сторінок, з них 143 сторінки основного тексту, 54 рисунки, 9 таблиць, список використаних джерел з 156 найменувань на 17 сторінках, 5 додатків на 23 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ МАНЕВРУВАННЯ ВЕЛИКОТОННАЖНИХ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ

1.1 Стислий аналіз аварійності та поширених проблем безпеки маневрування контейнеровозів

Для цілей даного дисертаційного дослідження було проведено аналіз матеріалів щодо розслідування морських аварій [47], [147]. Загалом опрацьовано 24 звіти [38], [65] за участю контейнеровозів доступні за період з 2012 р. по 2024 р.

Згідно з циркуляром ІМО MSC-MEPC.3/Circ.3 «Питання, пов'язані з аваріями. Звіти про морські аварії та інциденти» застосована наступна термінологія:

«Дуже серйозні аварії» – це аварії на суднах, які пов'язані з повною втратою судна, загибеллю людей або серйозним забрудненням. «Серйозні аварії» – це аварії на суднах, які не кваліфікуються як «дуже серйозні аварії» і які включають:

- пожежу, вибух, зіткнення, посадку на мілину, пошкодження внаслідок погодних умов, пошкодження при льодовому плаванні, пошкодження корпусу або підозра на дефект корпусу тощо, що призводить до:

- іммобілізації головних двигунів, значних пошкодження надбудови, серйозних пошкодження конструкції, що робить судно непридатним до руху, або спричинює забруднення (незалежно від кількості); та/або поломки, що вимагає буксирування або допомоги з берега [30], [32].

Морські аварії обрані для аналізу, класифікуються як дуже серйозні та серйозні морські аварії. Наслідки, що виникають внаслідок цих аварій, можна розділити на:

- чотири випадки затоплення судна, в трьох випадках з них загиблі люди;
- п'ятнадцять випадків, які пов'язані з серйозними структурними пошкодженнями судна та забрудненням, чотири поміж них включають травми осіб та летальний випадок;

- п'ятнадцять випадків, які пов'язані з серйозними структурними пошкодженнями судна та забрудненням, чотири з яких включають травми та летальний випадок;
- два випадки пошкодження конструкції судна та втрати контейнерів;
- один випадок, пов'язаний із втратою життя.

Дані, надані у звітах морських розслідувань та щорічних оглядів EMSA [16]–[18], [38], [64], виконують статистичну функцію. Однак головна мета підвищення безпеки судноплавства не може бути досягнута лише за допомогою аналізу статистичних даних. Отже, стратегія забезпечення мінімізації аварій на морі має полягати у визначенні першопричин з метою розробки ефективних методів їх запобігання.

Аналізуючи розподіл частоти виникнення морських аварій впродовж періоду з 2012 по 2024 роки, можна зазначити тенденцію до збільшення аварійності починаючи з 2016 року.

Згідно з аналізом UNTCAD від 2017 року [122], у 2016 році загальний попит на морські перевезення підвищився й обсяги світової морської торгівлі зросли на 2,6 відсотка (порівняно з 1,8 у 2015 році). Контракти перевезення вантажу у контейнерах збільшилися до 3,1 відсотка у 2016 році (порівняно з 1,5 % у 2015р.). Таким чином, обсяги досягли приблизно 140 мільйонів TEU. З іншого боку, деяке зменшення аварійності з 2019 року, можливе за рахунок економічних наслідків, спричиненими глобальною пандемією COVID–19.

Вивчаючи звіти про розслідування, морські аварії були розділені на категорії відповідно до типу: зіткнення, втрата життя або травма людини, втрата контейнерів, посадка на мілину. На рис. 1.1 приведений процентний розподіл аварій за типом. В рамках даного дослідження морських аварій за участю контейнеровозів переважаючий тип аварійної ситуації є зіткнення (62,5 %). Зіткнення судна можна трактувати як фізичну взаємодію між двома (або більше) суднами або спорудами, що призводить до аварії та пошкоджень.

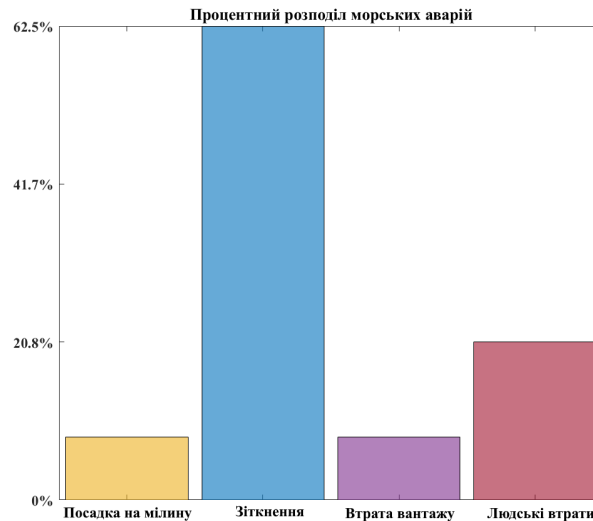


Рисунок 1.1 – Розподіл морських аварій контейнеровозів, розподілені за типом з 2012 по 2024 роки

Під час проведення аналізу, були вивчені фактори, що призвели до аварійних ситуацій. Основні з них були виділені, та використані для подальшого дослідження. Нижче зазначені 9 основних груп цих факторів:

- Неусвідомленість ситуації (Lack of situational awareness);
- Надмірна довіра діям лоцмана (Over-reliance on Pilot);
- Недостатньо ефективне управління ресурсами містка та роботою команди (Poor Bridge Resource Management (BRM) performance);
- Відсутність належних заходів безпеки при плануванні та виконанні певних робіт (Lack of safety precautions);
- Нехтування процедурами передачі вахтової служби (Poor changeover watch procedure);
- Використання радіозв'язку VHF для уникнення зіткнень (Use of VHF radio communication for collision avoidance);
- Некомпетентне використання навігаційного обладнання (Improper use of navigation equipment);
- Порушення вимог щодо плану розміщення та кріплення вантажу (Inadequate stowage and lashing plan);

– Невідповідне обслуговування суднового обладнання та систем (Inappropriate maintenance).

Важливим є той факт, що у всіх 24 вивчених випадках морських аварій, причини виникнення пов'язані із людським фактором.

З метою вивчення тенденції частоти виникнення причин, що приводять до морських аварій на контейнерному флоті, вони були розділені на первинні та вторинні. Процентний розподіл представлений на рис. 1.2, з якого видно, що саме фактор недостатньої, або повної неусвідомленості ситуації (Lack of situational awareness) в цьому аналізі переважає як первинна, так і вторинна причина в більшості випадків [47], [147].

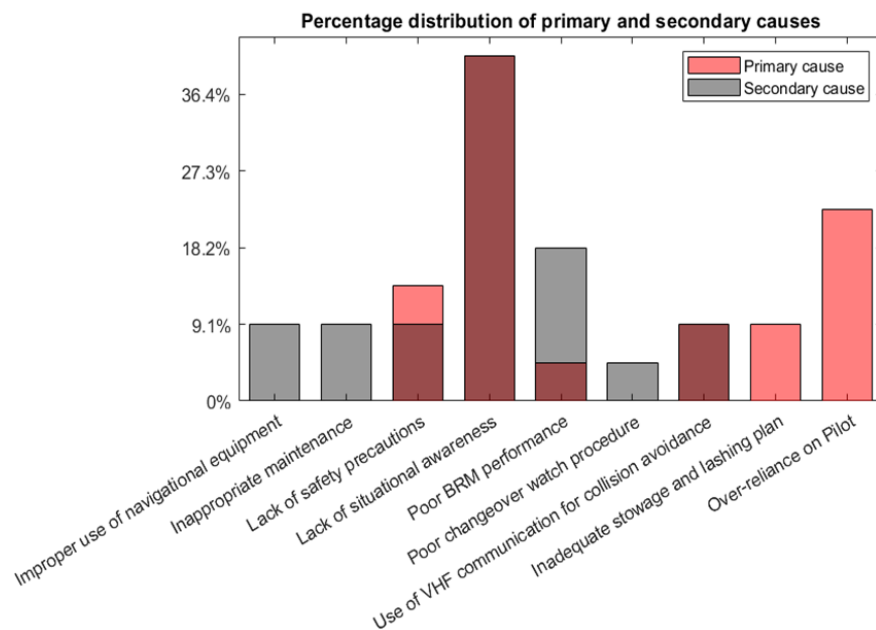


Рисунок 1.2 – Розподіл первинних та вторинних причин морських аварій контейнеровозів з 2012 по 2024 роки

Необхідно також зауважити, що в цьому документі термін «ситуаційна усвідомленість» додатково включає:

– дотримання правил МППЗС, щодо оцінки ризику зіткнення; наприклад «припущення не слід робити на підставі недостатньої інформації, особливо недостатньої радіолокаційної інформації» [14];

- підтримання належного спостереження (lookout);
- компетентність в обробці навігаційної інформації та її оцінці та ін.

Контейнерні судна відіграють важливу роль у міжнародних морських торговельних відносинах. Такі фактори як збільшення розмірів контейнерних суден, а також зростання контейнерного флоту мають значний вплив на безпеку судноплавства. Через скорочення екіпажу, робота моряка вимагає ще більшої концентрації відповідальності від меншої кількості людей, і це може призводити до підвищення ризику розвитку аварійної ситуації.

В результаті дослідження аварійності контейнеровозів було визначено, що найбільш поширеним типом морських аварій в межах аналізу постає зіткнення суден. Крім того, зазначено, що неусвідомленість ситуації при цьому переважає як первинна і вторинна причина в більшості випадків. Базуючись на рекомендаціях, які були надані у звітах про розслідування аварій, слід підкреслити, що вони переважно стосуються навчання, підготовки та перевірки компетентності екіпажу залученого у морську аварію. Таким чином, доцільно відмітити необхідність дослідження ключових факторів, що ведуть до неявного для судноводіїв розвитку небезпечної ситуації при маневруванні контейнеровозів, із метою удосконалення систем підтримки прийняття рішень для вчасного та ефективного інформування судноводіїв. У такий спосіб очікуваним є підвищення ефективності рішення навігаційних задач, шляхом забезпечення додаткових контрольних заходів, що сприяють підвищенню безпеки плавання.

1.2 Огляд сучасних підходів щодо оцінки маневрування судна

Оцінка маневреності є критично важливим аспектом безпеки судноплавства в контексті безпечних та ефективних морських перевезень. У даному підрозділі розглядаються сучасні методи оцінки маневреності судна, зосереджуючись як на традиційних, так і на прогресивних методах. Традиційні методи включають емпіричні формули та повномасштабні випробування, які дають практичну

інформацію, але можуть бути неточними в складних сценаріях. Удосконалені методи, такі як чисельне моделювання та випробування моделей, пропонують вищу точність і гнучкість, дозволяючи детально аналізувати поведінку судна в різноманітних умовах навколишнього середовища. Інтеграція цих методів із сучасними обчислювальними інструментами підвищує їх ефективність, забезпечуючи комплексні оцінки, які враховують такі фактори, як динаміка хвиль, сила вітру та продуктивність керма. Доцільно підкреслити важливість багатостороннього підходу, який поєднує емпіричні дані з вдосконаленим моделюванням для досягнення більш надійної оцінки маневреності.

У контексті перевезення контейнерів на відкритій палубі судна постає питання зменшення опору повітря без зміни кількості вантажу відповідно до призначення рейсу. Дане питання стало предметом для наведених нижче досліджень.

У роботі [5] експериментально досліджено вплив на контейнеровоз класу Post-Panamax в умовах вітрових навантажень. Загальною рекомендацією за результатами дослідження є конфігурація завантаження штабеля контейнерів і забезпечення розташування центру ваги бортової зони на кормі для зменшення вітрового навантаження на судно.

Дослідженню ускладнень маневрування великотоннажного контейнеровозу під дією вітру у відкритому морі присвячені роботи [71], [40]. Було показано, що закриття всіх проміжків між контейнерами значно зменшує поздовжній опір у широкому діапазоні напрямків вітру. Однак це дослідження не надає інформації про маневреність судна в цих умовах.

Теоретичні та експериментальні дослідження маневрування в умовах вітру, що діють на контейнеровоз 20 000 TEU, були проведені в дослідженні [126]. Результати CFD моделювання показали, що повітряний потік, який діє на контейнеровоз, є складним і включає багато типів завихрення. Потoki в зазорах між контейнерами відіграють вирішальну роль у гідродинамічних характеристиках сил вітру. Високий тиск чиниться на передню стінку першого

контейнерного відсіку та носову частину корпусу судна. Зменшення цих високих тисків може призвести до зменшення опору вітру на судні.

На основі чисельних результатів аеродинамічних характеристик великого контейнерного судна аналізується механізм вітрових потоків та наведений опір, і результуючий опір, а також крок за кроком розроблені заходи щодо зменшення опору повітря. Таким чином, у дослідженні [69] були отримані такі висновки: опір вітру обумовлений високим тиском, що діє на носові відсіки, і низьким тиском на кормі; вихровий потік, що утворюється на передній ємності і охоплює її верхню частину, може збільшити опір повітря; ефективними заходами для зниження опору вітру є використання крил, зменшення кількості контейнерів у передніх відсіках і закриття бічних щілин. У цьому дослідженні досягнуто зниження опору вітру на 11%. У роботі [70] аеродинамічні характеристики складних повітряних потоків, що діють на модель, яка також використовувалась у [69] та [126], були чисельно досліджені за допомогою CFD моделювання. Основною метою було зменшення опору повітря, особливо при невеликих кутах напрямку вітру. Чисельні результати показали, що опір повітря спричинений високим тиском, що діє на кожен відсік контейнерів. Зменшення опору повітря пропорційно розміру бічних кришок для закриття щілин.

У дослідженні [4] було досліджено маневреність контейнеровозу місткістю 9000 TEU під час випробувань у аеродинамічній трубі в умовах вітру. Дослідження досліджувало, як сила вітру залежить від плану завантаження на палубу контейнеровоза. Згідно з висновками, результати показали чіткий зв'язок між конфігурацією розміщення контейнера та силами вітру, що діють на модель судна, забезпечуючи загальне розуміння впливу розміщення контейнера на опір вітру. Поздовжня сила зростає зі збільшенням нерівності конфігурації, коли різниця у висоті між окремими штабелями була помітною, і якщо на палубі були високі штабелі, що перевищували висоту інших, це сприяло збільшенню поздовжньої сили. Поперечну силу менш складно передбачити, оскільки вона безпосередньо впливає на прогнозовану бічній площі судна (за винятком трьох

конфігурацій у формі піраміди), а для повністю завантаженого судна її можна зменшити, зменшивши висоту штабеля в крайніх штабелях. Рискання, згідно з висновками, залежить від розташування центру ваги судна. Чим ближче центр ваги був до корми, тим менший момент відхилення для відносно носового напрямку вітру. Загальна рекомендація цього дослідження полягає в плавній конфігурації розміщення контейнерів і їх концентрації таким чином, щоб центр бокового вітрила знаходився якомога ближче до корми.

У роботі [27] на прикладі як завантаженого, так і в баласті контейнерного судна місткістю 1200 TEU за допомогою CFD були розраховані аеродинамічні характеристики та опори вітру. Проаналізувавши отримані результати CFD, встановлено взаємозв'язок параметрів навантаження судна та аеродинамічними характеристиками й опором вітру. Для реального судна були запропоновані різні нові плани розміщення, щоб зменшити вплив вітру. Отримані результати в даній роботі показали ефективність розташування надбудови і контейнерів у носовій частині для значного зменшення впливу опору вітру на контейнерні судна, а також призводить до більш економічного споживання палива при морських перевезеннях.

Зовнішні сили і моменти можуть зменшувати швидкість судна, що призводить до обмеження маневреності. Для утримання на курсі через великий кут дрейфу судно повинно тримати значний кут перекладки стерна. Питання залежності маневреності від осадки знайшло відображення і в дослідницьких розробках. У дослідженні [76] розглядаються маневрені якості судна типу Ro-Ro з невеликою осадкою за умов постійного вітру. Для моделювання використовувалися різні співвідношення швидкості вітру до швидкості судна від 1,0 до 20,0 на діапазоні напрямків вітру від 0° до 180° . Результати чисельного моделювання показали, що вітер значно знижує швидкість судна при відносних кутах вітру менше 100° . Напрямок вітру також істотно впливає на кут дрейфу, особливо при значеннях менше 140° . Те саме явище спостерігалось для кута стерна. Необхідний кут стерна для утримання на курсі перевищує максимально

можливий, коли напрямок вітру становить 60° із співвідношенням швидкості вітру до швидкості судна 20 або більше. Згідно з висновками, максимальне зниження швидкості судна відбувається при носових кутах вітру до 30° . Швидкість і напрям вітру істотно впливають на зниження швидкості судна. Тому оператори суден повинні уникати умов зустрічного вітру.

Стаття [113] містить аналіз маневреності судна на основі реальних результатів, отриманих протягом кількох років експлуатації судна типу Ro-Ro/Passenger. Проаналізовано використання носового та кормового підрулюючих пристроїв, стерна та головного двигуна для протидії тиску вітру на представленій моделі. Було заявлено, що на судах в обмежених водах успішні маневри можна проводити не тільки при швидкості вітру понад 10 м/с, але і під час шквалів. Було доведено, що на судах з великою площею вітрильності, збільшення осадки судна не зменшує силу вітру або момент, що впливає на судно навколо вертикальної вісі.

Математичний опис впливу на рух морських транспортних засобів океанських хвиль розглянуто в доповіді [81]. Автори представили простий метод, який можна використовувати для точного моделювання. Цей метод включає параметри, пов'язані з рекомендованими спектральними характеристиками хвиль і конкретного розглянутого морського транспортного засобу. На основі описаного методу автори представили алгоритм, призначений для налаштування фільтрів формування при моделюванні хвильового руху. Отримані результати дозволяють формувати різні сценарії моделювання з конкретними станами моря та умовами плавання.

У статті [71] представлено концепцію багатофазної моделі, що включає занурену частину корпусу судна та навколишню приєднану масу води як єдине тіло із метою більш точного прогнозування маневреності судна. Для створення чисельної моделі руху тіла використовується метод скінченних елементів деформації DFEM (Detailed Finite Elements Model). У наступних роботах автори використовуватимуть представлену концепцію для побудови багатофазної

моделі руху судна з урахуванням аеродинамічної складової. Таким чином передбачається проведення аналізу власної частоти коливань та вимушеного руху об'єкта для подальшого комплексного аналізу характеристик.

Дослідження [75] розглядає питання стаціонарної рівноваги маневрування судна під спільною дією вітру та хвиль за допомогою чисельного моделювання для відносних кутів збурення в діапазоні від 0,0 градусів до 180,0 градусів. У висновку зазначено, що вітер істотно впливає на кут дрейфу судна при кутах хвилі та напрямку вітру менше 120,0 градусів. Значний вплив на кут перекладки стерна відчувається, коли кути хвилі і вітру більше 20,0 градусів. Вплив хвиль на кут дрейфу стає істотним при відносних напрямках від 20,0 градусів до 120,0 градусів. Необхідний кут перекладки стерна перевищує максимально можливий кут стерна судна, якщо амплітуда хвилі перевищує 1,25 метри або висота хвилі більше 2,50 метрів. На швидкість руху судна суттєво впливає швидкість вітру при кутах менше 40,0 градусів, а також більше 140,0 градусів. Вплив хвиль на швидкість судна суттєвий лише в діапазоні напрямків хвиль і вітру від 20,0 градусів до 100,0 градусів. Хвилі та вітер зменшують швидкість судна в умовах зустрічного вітру та хвиль, але збільшують швидкість судна в умовах супутнього вітру та хвиль.

Дослідження [147], [151] присвячені дослідженню методу визначення кута компенсації та підвищення його точності з урахуванням впливу зовнішніх збурень на маневреність судна. Перевагою запропонованого способу є зниження навантажень на рульовий механізм та створення умов для оптимізації його використання в штормових умовах та автоматизації керування судном під час руху криволінійними траєкторіями.

Для прогнозування траєкторії руху судна важливим параметром є полюс повороту, визначення якої досліджувалось у роботах [106], [146], [155]. Наведені дослідження підтверджують необхідність точного врахування положення полюсу повороту для окремих суден для підвищення безпеки та надійності при прогнозуванні та плануванні маневрів судна. Для цього в дослідженні [145]

запропонований розширений метод визначення векторів складного руху судна у зв'язаному вигляді, де елементи вектора встановлюються за даними поточного розрахунку шляху в режимі реального часу. При цьому результати визначають не величину відхилення судна від заданого шляху, а сумарний вектор фактичного дрейфу судна.

Вплив зовнішніх збурень на маневрені характеристики судна є предметом численних досліджень [42], [90], [96], [143], [152]–[154], [156]. Ці дослідження також пропонують методи та алгоритми інтеграції в системи підтримки прийняття рішень. Однак слід зазначити, що точність цих методів залежить від точності математичної моделі, а потенційні методи оптимізації обговорюються в дослідженнях [26], [95], [97], [152], [156].

Опір повітря зазвичай розраховується за допомогою емпіричних рівнянь, оскільки його вплив на загальний опір судна є відносно меншим порівняно з опором води. Однак для суден з великою площею вітрильності, таких як контейнерні судна, носії СПГ (скрапленого природного газу) та автомобілевози, вплив вітру може бути значним. В роботі [107] автори вивчали характеристики опору суден за допомогою методу корекції опору повітря. Характеристики опору суден за допомогою методу корекції опору повітря. Чисельне моделювання було проведено для порівняння загальної остійності контейнеровоза класу 8000 TEU. Умови чисельного моделювання перевірено шляхом їх порівняння з результатами дослідження форми корпусу KCS. Крім того, відмінності у вищезазначених значеннях між цими двома випадками порівнювали за допомогою коефіцієнтів, розрахованих за емпіричними формулами, щоб визначити їх вплив на коефіцієнт опору повітря. Результати продемонстрували відмінності в характеристиках опору між емпіричними методами та CFD з надбудовою. Це пояснюється тим, що при розрахунках опору вітру в емпіричних методах використовується площа надбудови та коефіцієнт вітрового навантаження. Таким чином, збільшення опору внаслідок зміни зовнішнього вигляду судна не враховується в емпіричних методах. Було визнано необхідним

провести подальші дослідження методів розрахунку опору повітря щодо наявності або відсутності надбудов і на різних типах суден з великими надбудовами для точної оцінки характеристик опору повномасштабних суден.

Дослідження [37] зосереджено на моделюванні статичних вітрових навантажень на пришвартований контейнеровоз для визначення безпечного робочого навантаження на кнехти. У цій роботі представлено тривимірне CFD усереднене за Рейнольдсом Нав'є–Стокса RANS (Reynolds–averaged Navier–Stokes) моделювання вітрових навантажень на контейнеровози, перевірка вимірювань у аеродинамічній трубі та аналіз впливу геометричних спрощень. Висновки цього дослідження вказують на те, що спрощення геометрії контейнеровоза може призвести до суттєво різних змодельованих вітрових навантажень на судно, навіть якщо прогнозовані площі судна, перпендикулярні напрямку вітру, подібні. Результати CFD моделювання детального контейнеровоза узгоджуються з відповідними вимірюваннями в аеродинамічній трубі, з абсолютною середньою різницею між змодельованим і вимірним вітровим навантаженням на судна приблизно 5,9 %. Більші відхилення були виявлені для конфігурацій з більш спрощеною геометрією. Моделювання зазорів між контейнерами (конфігурація С проти В) зменшує середнє загальне вітрове навантаження на судно. Моделювання гострої та тонкої форми корпусу зменшує середнє загальне вітрове навантаження. Це дослідження також демонструє, що застосування спрощених рівнянь для корекції блокування призводить до значних відхилень.

В роботі [102] було проаналізовано проектування та випробування системи, що імітує вплив вітрово–хвильових навантажень на пришвартовані судна. Система заснована на поворотних приводах, що діють на лінійні пружини, забезпечуючи досить швидку реакцію для відтворення коливальної складової вітру. Експерименти проводилися за трьома сценаріями: хвилі, вітер і їх сумісний вплив. Результати продемонстрували значний вплив вітру на систему зовнішніх збурень. Автори наголошують на появі ефекту суперпозиції, коли

хвилі та вітер діють на судно одночасно. Тому, щоб отримати більш безпечні та реалістичні результати тестування, необхідно враховувати як хвилі, так і вітер.

Метод, запропонований Блендерманном для розрахунку опорного тиску, застосовано в роботі [116] для розрахунку сили вітру для великотоннажного контейнеровозу. Блендерманн пропонує метод розрахунку опорного тиску на основі тиску на середній висоті та середнього тиску на цій висоті. Показано, що, залежно від шорсткості поверхні, опорний тиск може в 2–3 рази перевищувати тиск, що відповідає висоті 10 м. Отже, сили вітру потенційно значно недооцінені. Результати методу порівнюються з моделюванням CFD з використанням рівномірних і неоднорідних вхідних профілів. Порівняння продемонструвало достатню узгодженість між методом Блендерманна та результатами CFD для імпульсної сили та моменту хитамиці. У статті розглянуто застосування вітрових коефіцієнтів для розрахунку сил вітру, із зосередженням на виборі опорного тиску. Швидкість вітру на висоті 10 м вважається еталонною швидкістю, яка використовується для визначення еталонного тиску. Цей тиск є основою для розрахунку сили вітру та вітрових коефіцієнтів, які зазвичай отримують під час випробувань у аеродинамічній трубі. Однак профіль вітру в аеродинамічній трубі може значно відрізнятися від профілю в реальних умовах, що вимагає перегляду еталонного тиску.

Дослідження [62] спрямоване на підвищення точності визначення аеродинамічних властивостей повністю завантаженого типового контейнеровоза. Результати були перевірені на основі даних випробувань Національного консультативного комітету з аеронавтики. Чисельне моделювання контейнеровоза фокусується на кутах атаки вітру до 40° , отриманих із записаних даних рейсу контейнеровоза протягом значної тривалості. Дані випробувань можна передбачити з прийнятною точністю до кута вітру 20° . Аналіз рейсу контейнеровоза визначив діапазон похилих вітрів від 0° до 40° як статистично значущий для аеродинамічних навантажень. Чисельне моделювання проводилося для екстремальних випадків рейсових

даних. Крім вимірювання сили, перетворювачі тиску можуть реєструвати розподіл тиску на масштабованій моделі контейнеровоза. Модуль CFD забезпечує графічні виходи для вихорів і потоків. Автори дослідили цю особливість і працюють над якістю відтворення поля вітру навколо контейнеровоза, коли він маневрує в поворотних коливаннях. Вплив конфігурації розміщення вантажу на косі вітрові навантаження також є побічним продуктом цього дослідження.

З метою дослідження аеродинамічних характеристик на багатьох типах зовнішніх форм контейнеровозів були проведені експерименти в аеродинамічній трубі з використанням блочних моделей [35], подібних контейнерам на палубі. Наведено аеродинамічні характеристики для поздовжніх і бокових сил вітру та моментів відхилення цих моделей. Відношення площі недостатньої частини контейнерів у бічній проекції до площі повністю завантажених контейнерів на палубі є важливим фактором для представлення ефекту комбінованої або недостатньої форм завантаження контейнеровоза. На основі експериментальних результатів представлено методику оцінки коефіцієнтів сили вітру для контейнеровозів при різних режимах завантаження. Автори підкреслюють, що метод простий у використанні, оскільки представлений коефіцієнт розглядається лише як додатковий параметр порівняно з оригінальним методом оцінки вітрового навантаження. Показано, що запропонований метод розрахунку коефіцієнтів сили вітру відіграє важливу роль у визначенні безпечних параметрів, таких як швидкість судна, під час експлуатації контейнеровозів.

Регресійна модель для кількісного аналізу впливу вітру на поведінку судна запропонована в роботі [142], отримана на основі даних AIS (Automatic Identification System). Отримана модель забезпечує кількісну залежність впливу вітру та течії на поведінку руху з урахуванням габаритів суден. Деякі загальні маневри, такі як зміна курсу для слідування розробленому маршруту, також статистично виявляються результатами оцінки. У вказаній роботі вивчається

майже прямий водний шлях, що виключає вплив характеристик водного шляху на поведінку судна.

Маневреність судна під впливом вітру з точки зору остійності розглянуто у дослідженні [26]. Автори зазначили, що критерії стабільності, особливо впливу вітру та хвиль, слід розглядати якомога ближче до реальності. Коефіцієнти співвідношення критеріїв повинні бути розроблені таким чином, щоб результати застосування критеріїв збігалися з експериментальними та реальними даними, іншими словами, щоб вони були реалістичними прогнозами безпеки для очікуваних екстремальних умов. Стандартизований набір швидкостей вітру для аналізу остійності дозволив би знайти необхідні коефіцієнти. Швидкість вітру, підібрана для загального аналізу остійності, була розроблена та визначена в термінах різних категорій. Прийняття цих чи подібних швидкостей і категорій вітру дозволяє проводити аналіз остійності, який відповідає фактичному використанню та експлуатаційним обмеженням різних суден.

Дослідження [121] присвячено представленню впливу на маневреність контейнеровозів вітру з точки зору методів оцінки вітрових навантажень. Автори використовували метод узагальненої регресійної нейронної мережі (GRNN – General regression neural network), який навчається за допомогою еліптичних дескрипторів Фур'є. Вхідними даними є набори фронтальних і бічних замкнутих контурів, тоді як вихідними даними є коефіцієнти вітрового навантаження, які навчають систему та отримані в результаті обширного аналізу CFD RANS. Цей підхід підходить для оцінки вітрових навантажень на контейнеровозах, де є база даних вітрових навантажень для різних конфігурацій вантажу. Це досягається шляхом порівняння результатів аналізу CFD з відповідними експериментальними даними. Відповідним чином налаштувавши систему, можна було б проаналізувати всі можливі варіанти навантаження за допомогою аналізу CFD. Передбачається, що мережа, навчена на більшому наборі навчальних даних, може надати більш точні результати.

У статті [136] розглядаються два підходи до побудови моделей швидкості вітру на основі стохастичних диференціальних рівнянь (SDE – Stochastic differential equation), з метою розробки моделей, здатних відтворювати траєкторії швидкості вітру, які статистично описуються за допомогою розподілу Вейбулла та експоненціальної автокореляції. Був проведений статистичний аналіз даних про швидкість вітру, зібраних на метеорологічній станції в Ірландії, і ці дані були використані для визначення трьох моделей за реальними параметрами. Результати моделювання трьох моделей продемонстрували їх здатність певною мірою відтворювати траєкторії швидкості вітру зі статистичними властивостями, для яких вони були розроблені. Однак автори відзначили деяку неузгодженість результатів, оскільки формулювання кожної моделі істотно відрізняється.

1.3 Огляд методів дослідження зовнішніх збурень на судно та морські споруди

Одним із факторів, що призводять до людської помилки та потенційно до надзвичайної ситуації, є непередбачуваний вплив природних явищ, зокрема сильних вітрів. Порив вітру може не тільки зменшити швидкість судна та збільшити опір, що призведе до економічних втрат у рейсі, але й мати такі наслідки, як втрата контролю, сідання на мілину, перетягування якоря та відрив судна від причалу, серед інших. Для запобігання морським аваріям пропонуються різні методи оцінки вітрового навантаження на судна.

Аеродинамічні дослідження були зосереджені виключно на надводній частині корпусу судна з використанням експериментальної гідродинаміки (EFD) під час тестування моделі в аеродинамічній трубі, а також обчислювальної гідродинаміки (CFD). Ранні роботи зосереджувалися на силах, моментах і вітрових потоках, щоб оптимізувати конструкції надбудов і емпірично оцінити вплив сильних вітрів на маневреність. Останні наукові роботи зосереджені на середніх і турбулентних вітрових хвилях та їхньому впливі на бортову анемометрію та взаємодію з літаком, включаючи вихрові структури та контроль

поток. У жодному з оглянутих досліджень не розглядалися наслідки руху судна на вітрові хвилі або динамічний вплив вітру на рух і маневреність судна.

Моделювання динаміки судна у хвилях та його остійності здійснюється переважно за допомогою методів потенційного потоку (PF) та системних методів (SB). З метою вивчення руху судна переважно досліджуються спрощені моделі з обмеженими ступенями свободи, такі як 3DOF (Degrees of Freedom) або 4DOF. Цей вибір обумовлений не тільки високою складністю повного моделювання 6DOF, але й відсутністю даних тестування експериментальної гідродинаміки (EFD – Experimental Fluid Dynamics), доступних для підтвердження адекватності моделі. Крен і диферент судна, враховуючи певні обмеження, також можуть бути розраховані в лінійному діапазоні, залежно від поставлених завдань [19].

Методи SB забезпечують математичну основу для вивчення маневреності та остійності судна. Точність прогнозів методів SB значною мірою залежить від вхідних даних коефіцієнтів маневрування, ступенів свободи моделі та методів математичної моделі, які використовуються для врахування зовнішніх сил, сили стерна та рушійних сил.

На відміну від моделей SB (System-Based), методи Potential Fluid використовують теорію плоских перерізів (strip theory) для безпосереднього обчислення сил та моментів для прогнозування руху судна із 6DOF. Однак необхідно ввести емпіричні поправки для врахування ефектів в'язкості.

Одним із найпоширеніших ранніх методів вивчення впливу зовнішніх збурень на динаміку судна є регресійний аналіз [36], [129], [133], заснований на змінних, що складаються з параметрів, що відображають надводні структурні особливості суден. Блендерманн провів вимірювання в аеродинамічній трубці з нерівномірним повітряним потоком і запропонував метод оцінки вітрових навантажень на судна [8]. Повний статичний аналіз даних випробувань був проведений авторами [22], які запропонували рівняння для наближеної оцінки параметрів вітрового впливу. Автори [21] представили інші рівняння, де замість статистичного критерію аналізу враховано фізичну складову. Останній метод

зафіксував меншу кількість структурних параметрів — вісім, на відміну від дев'яти. Однак усі параметри можна підібрати тільки за наявності плану конкретного судна.

Виходячи з ідеї економії часу та уникнення трудомістких розрахунків вищезгаданих методів, автори в роботі [121] запропонували простий метод оцінки коефіцієнтів вітрового навантаження на судно. Метод в першому наближенні добре оцінює шість—сім параметрів, що відображають надводні конструктивні особливості судна, виходячи з типу, довжини і ширини судна. Було обрано дев'ять типів суден: танкери з повним завантаженням та у баласті, балкери з повним завантаженням та у баласті, LNG з повним завантаженням та у баласті, завантажений контейнеровоз, пасажирське судно, дослідницькі судна, рибальські судна, буксири та навчальні судна. Порівняння коефіцієнтів вітрового навантаження оцінених запропонованим простим методом із даними випробувань в аеродинамічній трубі та коефіцієнтами регресійного аналізу показало, що спрощений метод має прийнятну точність і корисність. Автори наголошують на доцільності використання запропонованої методики в умовах, що вимагають оцінки вітрових сил і моментів, що діють на судно, за обмежених даних і часу.

В роботі [120] представлено аналіз чотирьох доступних системних методів разом із порівняльним дослідженням на прикладі танкера в завантаженому стані та в баласті. Вітрові навантаження відрізняються з лівого і правого бортів, що пояснюється асиметрією палуби. Таким чином, коефіцієнти поздовжньої сили, поперечної сили та моменту крену представлені в межах кутів вітру від 0° до 180° . Для обраного в дослідженні танкера найбільш підходящим виявився метод OCIMF (Oil Companies International Marine Forum), а розрахунки за методом Блендерманна показали найточніші результати. Автори підкреслюють, що ці два методи є найбільш повними та надійними серед чотирьох обраних. Два інших базуються на статистичному аналізі, проведеному на обмеженому діапазоні експериментальних робіт.

В даний час експериментальна перевірка динаміки судна в умовах відкритого моря є одним із методів оцінки маневреності судна в реальних умовах. Очевидно, що такий підхід не може задовольнити всі необхідні умови, такі як безпека екіпажу, безпека судноплавства, економічна ефективність, екологічні та державні вимоги тощо.

Крім того, емпіричні дослідження вимагають більше часу для отримання та систематизації результатів. Оскільки питання динаміки судна в умовах сильного вітру все ще досліджується, результати можуть бути непередбачуваними. Таким чином, повномасштабний емпіричний метод з використанням реального судна може бути доцільним лише в поєднанні з попередніми розрахунками.

Інший емпіричний метод передбачає випробування зменшеної моделі обраного типу судна в аеродинамічній трубі (EFD). Результати таких тестів також використовуються для перевірки адекватності сучасних числових моделей.

Експерименти зазвичай проводяться в морському басейні певного розміру. Співвідношення середньої осадки до глибини враховується для визначення умов: випробування на глибокій або мілкій воді. Регулюється кількість обертів гвинта і відповідна швидкість моделі судна. Під час випробування, в залежності від мети дослідження, фіксується висота хвиль, рух судна, прискорення, кути перекладки стерна, кількість обертів гвинта, момент та тяга гвинта, навантаження на корпус судна та ін. Рух суден реєструється за допомогою оптичної системи стеження. Потенціометри використовуються для вимірювання кутів стерна.

У роботі [112] підкреслюється важливість точної оцінки впливу вітру на круїзні судна та контейнеровози, особливо під час швартування. Незважаючи на те, що сильні вітри є однією з головних небезпек для великих суден у портах, стандартизованих процедур для точної оцінки вітрових навантажень досі немає. У рамках цього дослідження були проведені випробування в аеродинамічній трубі, щоб дослідити ефект екранування зовнішніх конструкцій для зменшення сили вітру, що діє на моделі великого круїзного судна в масштабі 1:600 у порту

Монфальконе (Італія). Поздовжні та поперечні сили та моменти повороту були виміряні для трьох основних наборів випробувань: відкрите море, система судно–причал і система судно–причал–судно проти вітру. Результати продемонстрували високу залежність вітрового навантаження на судно від різних навколишніх конфігурацій. Було підкреслено зменшення аеродинамічних сил до 60% для напрямків вітру, ортогональних до судна. З одного боку, це кількісно продемонструвало, що ефект захисту від складних оточуючих будівель може підвищити безпеку порту шляхом зменшення загальних зовнішніх сил, що діють на судна. З іншого боку, автор цього дослідження підкреслює проблему невизначеності в оцінці вітрових навантажень при проектуванні причальної системи.

З моменту свого створення обчислювальна гідродинаміка (CFD) набула все більшої популярності завдяки більшій обчислювальній потужності та більш зручному представленню результатів. Незважаючи на переваги цього методу, він ще не повністю витіснив класичні методи оцінки вітрового навантаження на судна.

Результати випробувань, проведених в аеродинамічних трубах, також потребують підтвердження за допомогою повномасштабних експериментів. Таким чином, CFD моделювання підлягає подвійній перевірці.

Більшість доступних досліджень на основі CFD покладаються на порівняння результатів, отриманих за допомогою чисельних методів, із результатами, отриманими за допомогою експериментальних методів. Це пов'язано з відсутністю ідеальних моделей динаміки вітру та судна в умовах вітрового навантаження.

В підрозділі 1.1 представлені окремі дослідження, які базуються на використанні CFD [27], [37], [62], [70], [100], [116], [126]. Крім того, нижче наведено кілька прикладів інших досліджень, проведених за допомогою цього методу в області вітрових навантажень для різних типів суден.

Вітрові навантаження на моделі порома та напівзаглибленої морської платформи оцінювали за допомогою CFD у дослідженні [1]. Результати порівнювали з випробуваннями моделі в аеродинамічній трубі. Крім того, було проведено кілька повномасштабних вимірювань для корпусу порома. Були отримані прийнятні розбіжності. Порівняння розрахунків CFD, випробувань моделі аеродинамічної труби та повномасштабних експериментів показало загальну згоду, хоча в деяких напрямках вітру спостерігалися значні розбіжності. За словами авторів, різниця між результатами CFD і тестування моделі не перевищує різниці між результатами повномасштабного і модельного тестування. Таким чином, автори дійшли висновку, що визначення вітрових навантажень на судна та морські конструкції за допомогою CFD є чисельною альтернативою експериментальним методам. Порівняння параметрів повітряного потоку, розрахованих за допомогою CFD, з параметрами, отриманими в результаті тестування моделі та повномасштабних експериментів для порома в одному напрямку вітру, дозволило оцінити ефект масштабування. Така ж тенденція спостерігається при порівнянні результатів випробувань в аеродинамічній трубі з натурними експериментами.

Представлення результатів CFD-аналізу вітрових навантажень, що діють на модель СПГ-судна, та верифікація чисельної моделі шляхом порівняння результатів з експериментальними даними наведено в дослідженні [128]. Автори провели чисельний аналіз моделі, що обертається, з кроком 10 градусів, що відповідає серії випробувань моделі, проведених в аеродинамічній трубі. Результати представлені у вигляді коефіцієнтів опору та підйомної сили, а також моментів повороту. Автори відзначили, що отримані результати продемонстрували достатній рівень узгодженості з експериментальними даними. Помітні спостереження щодо поздовжніх сил показали, що розрахунки CFD занижують прогнозовані сили приблизно на 50%, показуючи однакову залежність від напрямку вітру. Прогноз бічних сил занижений приблизно на

30%. Різниця в розрахунках моменту повороту сягає приблизно 20% для деяких кутів, у той час як хороша згода була отримана для інших.

Більш ранні дослідження CFD були зосереджені на обчисленні фаз вітру та прогнозуванні потоку, а не аеродинамічних сил. У дослідженні [101] авторам вдалося створити модель турбулентного потоку повітря навколо загальної форми фрегата, досліджуючи наступні напрямки вітру: 0 градусів, 45 градусів і 90 градусів. Для поверхні води використовується гранична умова ковзання для компонентів швидкості. Для вивчення середніх і турбулентних коливань швидкості повітря навколо дослідницького судна Tangaroa автори [99] використали метод LES (Large-Eddy Simulation). До водної поверхні було застосовано граничну умову нульового градієнта, і моделювання проводилося з відносним напрямком вітру в діапазоні від 0 до 360 градусів з кроком 15 градусів.

У дослідженні [68] автор описав модель впливу океанських хвиль і вітру на судно, досліджуючи відповідні реакції: рухи, сили, моменти, схеми повітряних потоків, маневреність, остійність і керованість. Дослідження прикордонного шару повітря над двовимірними водними хвилями для різних відносних швидкостей і напрямків вітру/хвилі були проведені, щоб підтвердити підхід і отримати більш чітке фізичне розуміння вхідних хвиль/вітру, що діють на судно. Вплив вітру на рух судна, сили та моменти аналізували за допомогою Фур'є-реконструкції потоків. Додатково проведено аналіз керованості судна в вітрових хвильових умовах.

Робота [22] зосереджена на збільшенні опору через шорсткість моделі корпусу судна. Були проведені аеродинамічні експерименти та CFD моделювання. Автор відібрав гладкі та шорсткі моделі. Шорсткість у CFD моделюванні (RANS) була представлена відповідним коефіцієнтом. Експерименти та CFD моделювання проводилися з чотирма варіантами швидкості вільного потоку. Максимальна похибка отриманих експериментальних результатів становила $\pm 11,17\%$. Результати моделювання

порівнювали та узгоджували з емпіричними розрахунками Міжнародної конференції буксирувальних танків (ІТТС 1957), де різниця була нижче 1%.

1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі представлено аналіз проблем аварійності контейнерного флоту з акцентом на виявлення причин аварій, а також сучасних досліджень маневреності контейнеровозів та інших типів суден із великою площею вітрильності.

За результатами проведеного аналізу, слід підкреслити, що найбільш критичні етапи при маневруванні судна включають райони стислих вод, заходів у порти, каналів, річок. Таким чином в контексті підвищення безпеки судноводіння, доцільно розглянути саме питання маневрування великотоннажних контейнеровозів в портових акваторіях, в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування. Оскільки залучення буксирів є важливою умовою для безпечного проходу великотоннажних суден у портових водах, постає необхідність враховувати сили та моменти взаємодії між судном і буксирами при плануванні та виконанні маневрів.

Підсумовуючи, представлений матеріал підкреслює актуальність проведення досліджень і розробок у контексті підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів в портових акваторіях із залученням буксирів.

Зміст даного розділу викладено в роботах [45], [47], [147], [148], [149].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір та обґрунтування напрямку дисертаційного дослідження

Питання безпеки судноплавства при маневруванні великотоннажних контейнерних суден є актуальними у сьогоденні. Їх актуальність пов'язана із зростанням розмірів суден на світовому контейнерному флоті, обґрунтована оглядом й аналізом аварійності у галузі і вимагає удосконалення існуючих засобів та процесів, спрямованих на підвищення безпеки мореплавства та ефективності маневрування суден, і зменшення негативного впливу людського фактору. Окрема увага, в даному контексті, повинна приділятися маневруванню великотоннажних контейнеровозів в портових акваторіях, в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування, що також підкреслює необхідність врахування сил та моментів взаємодії між судном і буксирами при плануванні та виконанні маневрів, оскільки залучення буксирів є важливою умовою для безпечного проходу великотоннажних суден у портових водах. Таким чином, основним напрямком даного дисертаційного дослідження є удосконалення процесів та засобів, спрямованих на підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях.

Для проведення дослідження у визначеному напрямку у першому розділі була зазначена можливість використання математичних моделей руху великотоннажного контейнеровозу і буксирів, що працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування для прогнозування траєкторії руху судна. Таке використання зумовлює необхідність визначення гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна, їх верифікації за даними морських випробувань, а також математичне моделювання безпосередньо руху судна, враховуючи взаємодію з буксирами, їх маневреність. В свою чергу, алгоритм прогнозування траєкторії руху судна при спільному маневруванні з буксирами повинен:

- використовувати статичні та динамічні дані судна;
- використовувати статичні та динамічні дані залучених до маневрування буксирів;
- розраховувати координати та курси на основі математичної моделі судна, з урахуванням взаємодії з буксирами;
- графічно відображати розраховану траєкторію руху за налаштованим кроком відображення.

З метою верифікації відповідних моделей та алгоритмів необхідно виконати їх комп'ютерне моделювання.

Актуальність та перспективність проблеми удосконалення процесів та засобів, спрямованих на підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях, вирішення якої може бути реалізовано через удосконалення існуючих судових систем підтримки прийняття рішень при маневруванні та підходів до морських освітніх процесів також підтверджується Цілями сталого розвитку України відповідно до Указу Президента України №722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» й Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р із змінами, внесеними згідно з постановою КМ України від 28.04.2023 № 416). Таким чином, зумовлюється вибір теми дисертації, що формулюється у наступному вигляді: «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях».

Розв'язання зазначеної проблеми вимагає вирішення наступних завдань:

- використовуючи методи системного підходу, провести декомпозицію головного завдання даного дисертаційного дослідження на декілька допоміжних завдань;
- в контексті вирішення допоміжних завдань визначити складові математичної моделі руху судна, буксирів та їх взаємодії при виконанні спільного маневрування;

- побудувати алгоритм прогнозування траєкторії руху судна при спільному маневруванні з буксирами;
- виконати імітаційне моделювання для перевірки запропонованого алгоритму та відповідних математичних моделей;
- розробити пропозиції щодо удосконалення існуючих суднових систем підтримки прийняття рішень та підходів до морських освітніх процесів.

Таким чином, **об'єктом даного дослідження** є процес маневрування великотоннажних контейнеровозів.

Предметом дослідження є безпека маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях, зокрема із використанням буксирів.

Необхідність у підвищенні ефективності та безпеки судноплавства й зменшенні впливу людського фактору зумовлюють актуальність даного дисертаційного дослідження.

Передбачувана наукова новизна полягає у побудові нового алгоритму прогнозування траєкторії руху судна, зокрема при спільному маневруванні із буксирами, що базується на основі уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, що працюють у різних режимах роботи і з урахуванням обмежень їх маневреності.

Економічна ефективність даного дисертаційного дослідження полягає в тому, що удосконалення суднових систем підтримки прийняття рішень, шляхом впровадження нових алгоритмів прогнозування траєкторії руху, а також покращення існуючих освітніх інструментів у відповідності до сучасного рівня, можуть відігравати значну роль у запобіганні виникненню й протидії аварійним ситуаціям, та, як наслідок, можуть зменшити матеріальні витрати і негативний екологічний ефект на довкілля.

Імітаційне моделювання розробленої теоретичної частини запропонованого наукового дослідження забезпечує можливість його реалізації.

2.2 Формування технологічної карти наукового дослідження

Технологічна карта дисертаційного дослідження, що представляє собою реалізацію системного підходу до забезпечення вирішення головного завдання даної дисертаційної роботи, представлена на рис. 2.1.

Відповідно до технологічної карти, тема дисертаційного дослідження зумовлена запитом практики, що полягає у необхідності підвищення безпеки судноплавства в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування надвеликих суден у портових акваторіях.

Метою дослідження є удосконалення існуючих процесів та засобів, спрямованих на підвищення ефективності і безпеки судноплавства, й зменшення впливу людського фактору, в контексті управління великотоннажними контейнеровозами в портових акваторіях.

У відповідності до мети представлена наукова гіпотеза, що сформульована як можливість використання математичних моделей руху судна, зокрема великотоннажного контейнеровозу, і буксирів, що працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування для прогнозування траєкторії руху судна.

Таким чином, формулюється головне завдання дисертаційного дослідження, а саме: побудова алгоритму прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі адекватних математичних моделей руху судна і буксирів, які працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування в портових акваторіях.

Для вирішення головного завдання дисертаційного дослідження воно було розділено на допоміжні задачі, а саме:

- 1) математичне моделювання руху великотоннажного контейнеровозу та верифікація математичної моделі за даними випробувань;
- 2) математичне моделювання взаємодії судна та буксирів, з врахуванням обмежень маневреності буксирів;

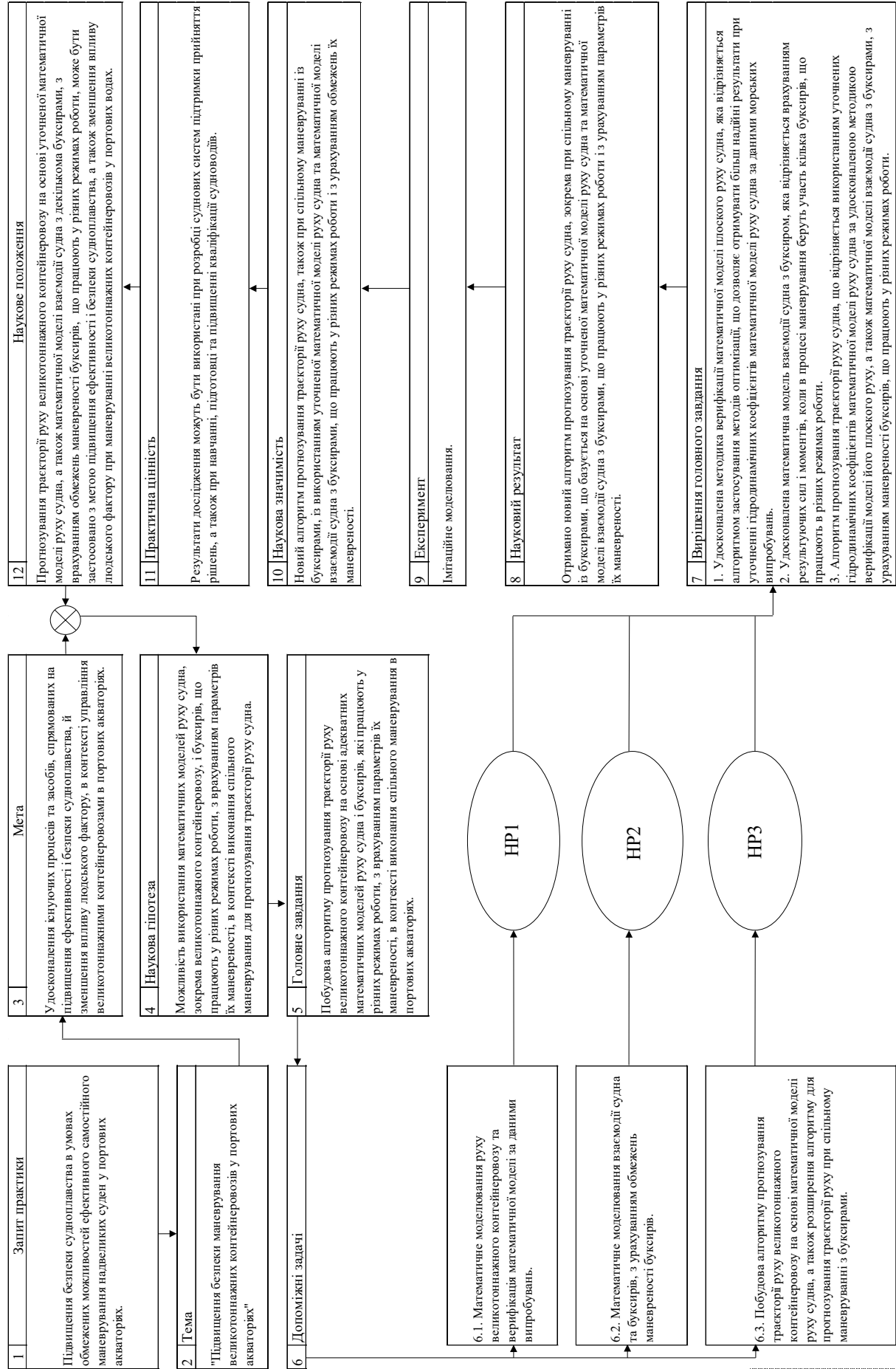


Рисунок 2.1 – Технологічна карта наукового дослідження

3) побудова алгоритму прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі математичної моделі руху судна, а також розширення алгоритму для прогнозування траєкторії руху при спільному маневруванні з буксирами.

Для вирішення першого допоміжного завдання необхідно обрати великотоннажний контейнеровоз, характеристики якого відповідають вимогам даного дисертаційного дослідження та з існуючими наявними результатами випробувань. Базуючись на існуючих математичних моделях руху судна на площині, необхідно описати відповідну математичну модель і за емпіричними формулами розрахувати гідродинамічні коефіцієнти судна. Надалі розраховані коефіцієнти повинні бути уточнені за допомогою алгоритмів оптимізації на основі даних випробувань.

Для вирішення другого допоміжного завдання необхідно описати математичну модель руху буксира на площині з урахуванням бортових коливань, формалізувати результуючі штовхальні та тягові сили буксирування, описати математичну модель взаємодії між судном і буксирами з урахуванням результуючих сил буксирування та провести відповідне імітаційне моделювання.

Для вирішення третього допоміжного завдання необхідно розробити алгоритм прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі отриманої уточненої математичної моделі руху судна. Цей алгоритм повинен враховувати змінні вхідні параметри судна та буксирів для розрахунку прогнозованого положення. Використовуючи описану математичну модель взаємодії судна та буксирів, алгоритм має бути розширений для прогнозування траєкторії при спільному маневруванні з буксирами, що працюють у різних режимах роботи.

З метою верифікації запропонованого алгоритму прогнозування траєкторії на основі математичної моделі руху судна і буксирів необхідно провести імітаційне моделювання в режимі реального часу, а саме сценаріїв маневрування

судна та буксирів, з використанням налаштованих та верифікованих тривимірних моделей велокотоннажного контейнеровозу та буксирів.

При рішенні допоміжних завдань були отримані наукові результати, що мають наукову новизну та на технологічній карті даного дисертаційного дослідження відповідно позначені як «НР1», «НР2» та «НР3».

Науковий результат першого допоміжного завдання полягає у отриманні удосконаленої методики верифікації математичної моделі плоского руху судна, яка відрізняється алгоритмом застосування методів оптимізації, що дозволяє отримувати більш надійні результати при уточненні гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за даними морських випробувань.

Науковим результатом другого допоміжного завдання є отримання удосконаленої математичної моделі взаємодії судна з буксиром, яка відрізняється врахуванням результуючих сил і моментів, коли в процесі маневрування беруть участь кілька буксирів, що працюють в різних режимах.

Науковим результатом третього допоміжного завдання є алгоритм прогнозування траєкторії руху судна, що відрізняється використанням уточнених гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за удосконаленою методикою верифікації моделі його плоского руху, а також математичної моделі взаємодії судна з буксирами, з урахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи.

За результатами вирішення допоміжних задач був отриманий результат вирішення головної задачі дослідження, що полягає у отриманні нового алгоритму прогнозування траєкторії руху судна, зокрема при спільному маневруванні із буксирами, що базується на основі уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, що працюють у різних режимах роботи і з урахуванням обмежень їх маневреності.

Використовуючи метод імітаційного моделювання проведено верифікацію результатів дисертаційного дослідження.

Таким чином, гіпотеза про можливість використання математичних моделей руху судна, зокрема великотоннажного контейнеровозу, і буксирів, що працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування для прогнозування траєкторії руху судна була підтверджена теоретичними результатами та імітаційним моделюванням.

Наукова значимість даного дисертаційного дослідження полягає у отриманні алгоритму прогнозування траєкторії руху судна, також при спільному маневруванні із буксирами, із використанням уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, що працюють у різних режимах роботи і з врахуванням обмежень їх маневреності, а практична цінність зумовлена тим, що результати дослідження можуть бути використані при розробці судових систем підтримки прийняття рішень, а також при навчанні, підготовці та підвищенні кваліфікації судноводіїв.

Наукове положення даного дисертаційного дослідження формулюється наступним чином: прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі уточненої математичної моделі руху судна, а також математичної моделі взаємодії судна з декількома буксирами, з врахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи, може бути застосовано з метою підвищення ефективності і безпеки судноплавства, а також зменшення впливу людського фактору при маневруванні великотоннажних контейнеровозів у портових водах.

2.3 Методика виконання дисертаційного дослідження

В даному підрозділі наведено стислий виклад методики проведення дисертаційного дослідження. В ході його виконання були використані методи емпіричного, теоретичного та експериментально-теоретичного рівнів наукового пізнання.

Методом дедукції, базуючись на результатах аналізу аварійності на контейнерному флоті, а також досліджень щодо питань маневреності великотоннажних суден, в особливості контейнеровозів, відповідного впливу вітрохвильових навантажень, а також гідродинамічних характеристик таких суден, були визначені проблеми безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях і встановлено напрямок дослідження та тема дисертації. Надалі, використовуючи методи системного підходу, було виконано декомпозицію головного завдання дослідження на окремі складові елементи й забезпечення методологічного обґрунтування дисертаційного дослідження.

Вирішення першого допоміжного завдання забезпечується вибором математичної моделі плоского руху судна на основі аналізу існуючих математичних моделей і подальшого уточнення гідродинамічних коефіцієнтів базуючись на методиці верифікації математичної моделі судна за даними випробувань. Коефіцієнти уточнюються за допомогою алгоритмів оптимізації, зокрема Нелдера-Міда та генетичних алгоритмів, а також даних випробувань типових маневрів судна, таких як: розгін, активне та інерційне гальмування, циркуляція та «зігзаг 10/10».

Вирішення другого допоміжного завдання забезпечується шляхом математичного моделювання руху буксира на площині з урахуванням бортових коливань, на основі існуючих моделей і подальшої формалізації результуючих сил таких режимів роботи буксира, як штовхання та тягання для їх урахування в математичній моделі взаємодії судна з буксирами і проведення відповідного імітаційного моделювання застосовуючи програмне забезпечення MATLAB.

Вирішення третього допоміжного завдання реалізується шляхом алгоритмізації отриманих математичних моделей руху судна та буксирів у контексті прогнозування траєкторії судна, що передбачає використання змінних вхідних даних в процесі маневрування судна і буксирів, та проведення відповідного імітаційного моделювання застосовуючи графічне середовище

імітаційного моделювання MATLAB Simulink. Далі алгоритм має бути верифікований в рамках тривимірного імітаційного моделювання спільного маневрування судна та буксирів в режимі реального часу за допомогою попередньо налаштованого середовища розробки.

Завершальним кроком дослідження є проведення імітаційного моделювання в режимі реального часу з повною візуалізацією об'єктів, для забезпечення якого необхідно виконати тривимірне моделювання судна і буксирів, базуючись на попередньо отриманих параметрах, а також визначених й формалізованих залежностях.

2.4 Висновки до другого розділу

В цьому розділі було обрано та обґрунтовано напрямок дисертаційного дослідження і його теми, представлена технологічна карта, що описує його методологічну структуру, приведено відповідне методологічне забезпечення.

Відповідно до представленої технологічної карти дослідження, його головне завдання полягає в побудові алгоритму прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі адекватних математичних моделей руху судна і буксирів, які працюють у різних режимах роботи, з врахуванням обмежень їх маневреності, в контексті виконання спільного маневрування в портових акваторіях. Для вирішення головного завдання було використано системний підхід, згідно з яким була проведена його декомпозиція на три допоміжні завдання.

Також у другому розділі були сформульована мета, наукова гіпотеза, визначені об'єкт та предмет дослідження, були зазначені його актуальність та економічна ефективність, наукова значимість та практична цінність, зумовлена тим, що результати даного дослідження можуть бути використані при розробці суднових систем підтримки прийняття рішень, а також при навчанні, підготовці та підвищенні кваліфікації судноводіїв.

Отриманими результатами теоретичного дослідження та імітаційним моделюванням, що забезпечує можливість реалізації розробленої теоретичної частини запропонованого наукового дослідження, була підтверджена наукова гіпотеза даної роботи. Відзначено, що отриманим науковим результатам даного дисертаційного дослідження притаманна наукова новизна.

Було наведено формулювання наукового положення даної роботи, що формулюється наступним чином: прогнозування траєкторії руху великотоннажного контейнеровозу на основі уточненої математичної моделі руху судна, а також математичної моделі взаємодії судна з декількома буксирами, з врахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи, може бути застосовано з метою підвищення ефективності і безпеки судноплавства, а також зменшення впливу людського фактору при маневруванні великотоннажних контейнеровозів у портових водах.

Зміст даного розділу викладено в роботах [42]–[45], [47]–[49], [91]–[93], [147]–[150].

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ КОНТЕЙНЕРНОГО СУДНА

3.1 Аналітичне моделювання плоского руху судна

Математична модель маневрового руху судна базується на моделі MMG (Manoeuvring Modelling Group) [131] та описана на основі системи рівнянь поздовжнього, поперечного рухів судна, а також ристання, які дозволяють обчислювати горизонтальні рухи з урахуванням їх взаємного зв'язку. В межах моделювання використовуються такі припущення:

- 1) Судно вважається твердим тілом.
- 2) Гідродинамічні сили, що діють на судно, вважаються квазістаціонарними.
- 3) Бічна складова швидкості мала порівняно з поздовжньою.
- 4) Швидкість судна низька, тому ефектом хвиле утворення можна знехтувати.
- 5) Метацентрична висота досить велика, а вплив крену на маневрування є незначним.

На рис. 3.1 зображено дві системи координат, які використовуються в даному розділі: глобальна нерухома система координат у просторі $O - XYZ$ де площина XY збігається з поверхнею води, а вісь Z спрямована вертикально вниз та локальна нерухома система координат рухомого судна $o - xyz$, де o знаходиться на мідель-шпангоуті судна, а вісі x, y, z вказують на носову частину судна, на правий борт і вертикально вниз відповідно.

Курсовий кут ψ визначається як кут між осями X і x . Кут перекладки стерна – δ , а кутова швидкість позначається r . Компоненти швидкості в напрямках x і y відповідно – u, v . U_R – швидкість набігу потоку води на стерні; α_R – кут атаки потоку води на стерні. Центр ваги судна знаходиться в точці з координатами $(x_G, 0, 0)$ в системі $o - xyz$.

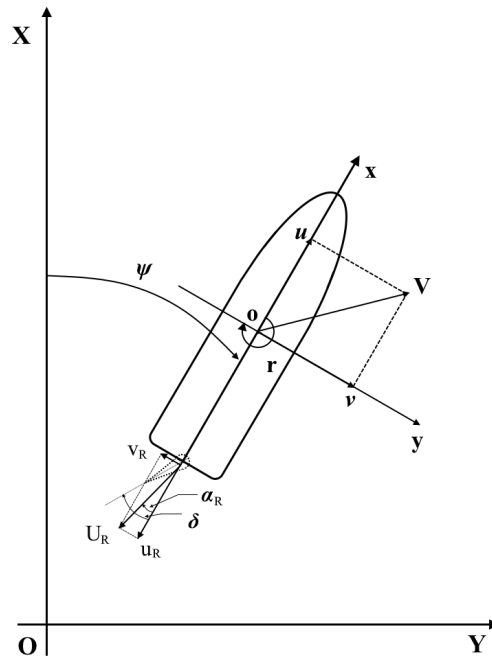


Рисунок 3.1 – Система координат судна

Систему рівнянь, що описує плоский рух судна, запишемо в наступній формі [40], [131]:

$$\begin{cases} (m + m_x) \cdot \dot{u} - (m + m_y) \cdot vr - x_G \cdot m \cdot r^2 = X \\ (m + m_y) \cdot \dot{v} + (m + m_x) \cdot ur + x_G \cdot m \cdot \dot{r} = Y \\ (I_{zz} + x_G^2 m + J_{zz}) \cdot \dot{r} + x_G m (\dot{v} + ur) = N \end{cases}, \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} X = X_H + X_P + X_R \\ Y = Y_H + Y_R \\ N = N_H + N_R \end{cases}, \quad (3.2)$$

де m, m_x, m_y – маса судна;

I_{zz}, J_{zz} – момент інерції відносно вертикальної вісі z ; u, v – компоненти поздовжньої та поперечної складової швидкості судна відповідно; \dot{u}, \dot{v} – компоненти поздовжньої та поперечної складової прискорення судна відповідно; r, \dot{r} – кутова швидкість та прискорення ристання відповідно; x_G – x координата центру тяжіння; X, Y, N – поздовжня та поперечна

гідродинамічні сили, а також момент обертуту (рискання) відносно вертикальної вісі.

Індекси H , P , R відповідають гідродинамічним силам та моментам, що діють на корпус, гвинт і стерно відповідно.

Гідродинамічні сили та момент, що діють на корпус судна, маса, додана маса, момент інерції, доданий момент інерції та інші кінематичні параметри є безрозмірними, як наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Безрозмірність сил, моменту, кінематичних та інших параметрів

Параметр	Безрозмірний по
X'_H	$\frac{\rho}{2} \cdot L \cdot d \cdot U^2$
Y'_H	$\frac{\rho}{2} \cdot L \cdot d \cdot U^2$
N'_H	$\frac{\rho}{2} \cdot L^2 \cdot d \cdot U^2$
(m', m'_x, m'_y)	$\frac{\rho}{2} \cdot L^4 \cdot d$
(I'_{zz}, J'_{zz})	$\frac{\rho}{2} \cdot L^4 \cdot d$
(u', v')	U
r'	U / L

де L – довжина судна між перпендикулярами, м; d – середня осадка судна, м; U – швидкість судна, м/с ; ρ – щільність води, кг/м³.

Сили та моменти, що діють на корпус судна можуть бути визначені наступним чином [131]:

$$\begin{cases} X_H = \frac{\rho}{2} \cdot L \cdot d \cdot U^2 \cdot X'_H \\ Y_H = \frac{\rho}{2} \cdot L \cdot d \cdot U^2 \cdot Y'_H \\ N_H = \frac{\rho}{2} \cdot L \cdot d \cdot U^2 \cdot N'_H \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} X'_H = X'_{vr} v' r' + X'_{vv} v'^2 + X'_{rr} r'^2 + X'_{vvv} v'^3 \\ Y'_H = Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vv} v'^2 + Y'_{rr} r'^2 + (Y'_{vrr} r' + Y'_{rvr} v') \cdot v' r' \\ N'_H = N'_v v' + N'_r r' + N'_{vv} v'^2 + N'_{rr} r'^2 + (N'_{vrr} r' + N'_{rvr} v') \cdot v' r' \end{cases}, \quad (3.4)$$

де $X'_{vr}, X'_{vv}, X'_{rr}, X'_{vvv}, Y'_v, Y'_r, Y'_{vv}, Y'_{rr}, Y'_{vrr}, Y'_{rvr}, N'_v, N'_r, N'_{vv}, N'_{rr}, N'_{vvr}, N'_{vrr}$ – гідродинамічні похідні (коефіцієнти) маневрування.

Силу упору гвинта можна розрахувати згідно формулам [50]–[52], [131]:

$$X_P = \frac{(1 - t_P) \cdot D_P^4 \cdot K_T(J) \cdot n^2}{\frac{\rho}{2} \cdot L \cdot d \cdot U^2}, \quad (3.5)$$

$$K_T(J) = C_0 + C_1 J + C_2 J^2, \quad (3.6)$$

$$J = \frac{u_P \cdot (1 - w_P) \cdot k_P v_0 \tilde{v}}{n \cdot D_P}, \quad (3.7)$$

$$w_P = w_{PO} \cdot \exp\left(-4(\beta_P - x'_P r')\right), \quad (3.8)$$

де t_P – коефіцієнт зменшення упору; D_P – діаметр гвинта; n – кількість оборотів гвинта за хвилину; K_T – коефіцієнт упору гвинта; J – відносна хода гребного гвинта; $C_{0,1,2}$ – коефіцієнти подання (3.6), що залежать від геометричних параметрів гвинта; u_P – швидкість набігу потоку води на гвинт; w_P – коефіцієнт попутного потоку; k_P – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив криволінійного руху судна на величину u_P ; v_0 – початкова швидкість судна; \tilde{v} – безрозмірна відносна поточна швидкість; w_{PO} – коефіцієнт попутного потоку

при прямолінійному русі; β_P – кут дрейфу гвинта; x_P – x координата розташування гвинта; r – кутова швидкість.

Визначення сил та моменту, викликаних роботою стерна, можливе за наступними формулами [134]:

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_R) \cdot F_N \cdot \sin \delta \\ Y_R = -(1 - a_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta \\ N_R = -(x_R + a_H x_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta \end{cases}, \quad (3.9)$$

$$F_N = \frac{A_R}{L \cdot d} \cdot f_a \cdot U_R^2 \cdot \sin \alpha_R, \quad (3.10)$$

$$\alpha_R = \delta - \delta_0 - \gamma \cdot (\beta - l'_R \cdot r'), \quad (3.11)$$

$$\delta_0 = - \left(\frac{\pi \cdot (1 - u \cdot (1 - w_P))}{90 \cdot n \cdot P} \right), \quad (3.12)$$

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}, \quad (3.13)$$

$$u_R = \varepsilon \cdot u_P \cdot \sqrt{\eta \cdot \left\{ 1 + \kappa \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)}, \quad (3.14)$$

$$v_R = u_R \cdot (\delta_0 + \gamma \cdot \beta'_R), \quad (3.15)$$

$$\kappa = 0.6 / \varepsilon, \quad (3.16)$$

$$\eta = D_P / H_R, \quad (3.17)$$

де t_R , a_H , x_H – коефіцієнти, що відображають гідродинамічну силу та момент на корпусі судна від гвинта та стерна; F_N – нормальна сила на стерні; A_R – площа пера стерна; f_a – коефіцієнт підйомної сили стерна; U_R – швидкість набігу потоку води на стерні; α_R – кут атаки потоку води на стерні; δ – поточний кут перекладки стерна; δ_0 – нейтральний (нульовий) кут перекладки стерна; γ – коефіцієнт скосу потоку води на стерні; β – кут дрейфу; P – коефіцієнт кроку гвинта; ε – коефіцієнт попутного потоку на гвинт і стерно.

Коефіцієнти t_R , a_H , x_H , f_a , ε , γ можна наближено розрахувати за допомогою емпіричних формул або апроксимувати за результатами випробувань. Коефіцієнти $C_{0,1,2}$ взято з досліджень [50]–[52]. Додану масу і момент можна розрахувати за допомогою рівнянь наведених нижче [28], [108]:

$$\begin{cases} m_x = \left(\frac{2.7 \cdot \rho}{L^2} \right) \cdot (C_b \cdot L \cdot B_d)^{5/3} \\ m_y = \left(\frac{\pi \rho L d^2}{2} \right) \cdot \left[1 + 0.16 \cdot C_b \cdot \frac{B}{d} - \frac{5.1}{(L/B)^2} \right], \\ J_{zz} = \left(\frac{\pi \rho L^3 d^2}{24} \right) \cdot \left[1 + 0.2 \cdot C_b \cdot \frac{d}{B} - \frac{4}{(L/B)} \right] \end{cases}, \quad (3.18)$$

3.2 Визначення гідродинамічних коефіцієнтів моделі та їх уточнення за параметрами типових ходових маневрів

Для коректного моделювання поведінки судна в контексті даного дослідження, необхідною умовою є визначення достовірної моделі судна, що може бути досягнуто шляхом уточнення гідродинамічних коефіцієнтів рівнянь (3.4), (3.9), (3.11), (3.14) за допомогою оптимізаційних алгоритмів.

В даному підрозділі представлені результати аналітичного приведення поведінки моделі до реальних результатів випробувань контейнеровоза 2019 року та місткість 23000 TEU – «MSC Nela». Основні характеристики судна неведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики т/х «MSC Nela»

Параметр	Умовне позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Довжина найбільша	L	м	399,70
Довжина між перпендикулярами	L_{pp}	м	383,10
Ширина	B	м	61,00

Продовження таблиці 3.2

Осадка максимальна	d	м	16,50
Осадка носом при випробуваннях	d_f	м	4,46
Осадка кормою при випробуваннях	d_a	м	10,8
Коефіцієнт повноти в баласті	Cb		0,660
Коефіцієнт площини мідель-шпангоута в баласті	Cm		0,974
Діаметр гвинта	Dp	м	10,50
Площа пера стерна	Ar	м ²	115,01
Коефіцієнт опору	X_0		-0,035

Базуючись на дослідженні коригування математичної моделі контейнеровозу місткістю 10000 TEU за результатами випробувань, в першу чергу необхідно налаштувати параметри хідкості математичної моделі [97], [156]. Типовими маневрами для оцінки параметрів хідкості є розгін, активне й інерційне гальмування, результати яких взято зі звіту випробувань MSC Nela [64].

Оскільки при моделюванні перо стерна знаходиться в нульовому положенні, першим рівнянням системи (3.9) можна знехтувати. Таким чином, для поточних розрахунків, рівняння поздовжнього руху судна по вісі X, беручи до уваги формули (3.1), (3.2), (3.5), можна виразити у наступній формі:

$$\ddot{u} = \frac{(1-t_p) \cdot \rho \cdot D_P^4 \cdot K_T(J) \cdot n \cdot |n| + 0.5 \cdot X_0 \cdot \rho \cdot L \cdot d \cdot U^2}{m + m_x}, \quad (3.19)$$

$$t_p = 0.325 \cdot C_b - \frac{0.1885 \cdot D_p}{\sqrt{B \cdot d}}, \quad (3.20)$$

$$w_p = 0.5 \cdot C_b - 0.05, \quad (3.21)$$

де X_0 – коефіцієнт сили опору.

Для уточнення коефіцієнтів використовується алгоритм Нелдера–Міда. Слід відзначити, що наведене в даному розділі моделювання було проведено за допомогою програмного забезпечення (далі ПЗ) MATLAB R2024a. Застосовані алгоритми оптимізації є інтегрованими в зазначене ПЗ, що дозволяє використовувати цей функціонал за попередньо налаштованими користувачем параметрами.

Цільова функція оптимізації F , що враховує параметри даних маневрів розгону, активного гальмування та інерційного гальмування представлена у наступному вигляді [97], [156]:

$$F = w_u \cdot F(U_{TR}, U_O) + w_u \cdot F(U_{DTR}, U_{DO}) + w_s \cdot F(S_{DTR}, S_{DO}) + w_u \cdot F(U_{CSTR}, U_{CSO}) + w_s \cdot F(S_{CSTR}, S_{CSO}), \quad (3.22)$$

$$F = w_u \cdot \left(\frac{\sum_{n=1}^N |U_{TRn} - U_{On}|}{N} + \frac{\sum_{n=1}^N |U_{DTRn} - U_{DOn}|}{N} + \frac{\sum_{n=1}^N |U_{CSTRn} - U_{CSOn}|}{N} \right) + w_s \cdot \left(\frac{\sum_{n=1}^N |S_{DTRn} - S_{DOn}|}{N} + \frac{\sum_{n=1}^N |S_{CSTRn} - S_{CSOn}|}{N} \right), \quad (3.23)$$

де w_u – ваговий коефіцієнт цільової функції швидкості, що дорівнює 1; w_s – ваговий коефіцієнт цільової функції дистанції, що дорівнює 0,001; U_{TR} – швидкість при заданих оборотах гвинта, значення якої взято з даних випробувань маневру розгону; U_O – розрахункова швидкість при заданих оборотах гвинта для маневру розгону;

U_{DTR} – швидкість у відповідний момент часу, значення якої взято з даних випробувань маневру інерційного гальмування; U_{DO} – розрахункова швидкість у відповідний момент часу для маневру інерційного гальмування; S_{DTR} – дистанція

у відповідний момент часу, значення якої взято з даних випробувань маневру інерційного гальмування; S_{DO} – розрахункова дистанція у відповідний момент часу для маневру інерційного гальмування; U_{CSTR} – швидкість у відповідний момент часу, значення якої взято з даних випробувань маневру активного гальмування; U_{CSO} – розрахункова швидкість у відповідний момент часу для маневру активного гальмування; S_{CSTR} – дистанція у відповідний момент часу, значення якої взято з даних випробувань маневру активного гальмування; S_{CSO} – розрахункова дистанція у відповідний момент часу для маневру активного гальмування.

Початкові значення коефіцієнтів взято з наведених для контейнерного типу суден DTC (DuisburgTestCase) у дослідженнях [51], [52]. Через значне відхилення початкових референтних значень, уточнення проводилось чотири рази, при чому вхідні дані оновлювалися виходячи з результату попереднього етапу. Результати визначення уточнених коефіцієнтів відображені на рис. 3.2–3.4, а також в табл. 3.3.

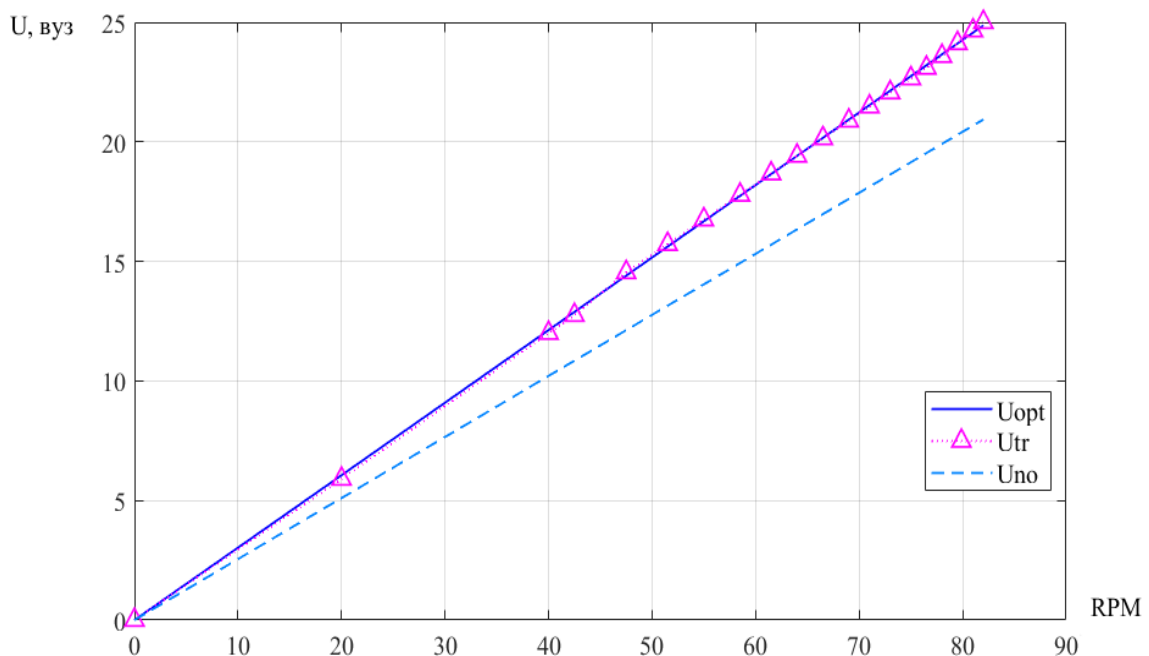


Рисунок 3.2 – Криві залежності швидкості моделі від кількості об/хв. U_{opt} – результат уточнення; U_{tr} – дані випробувань; U_{no} – початкові значення

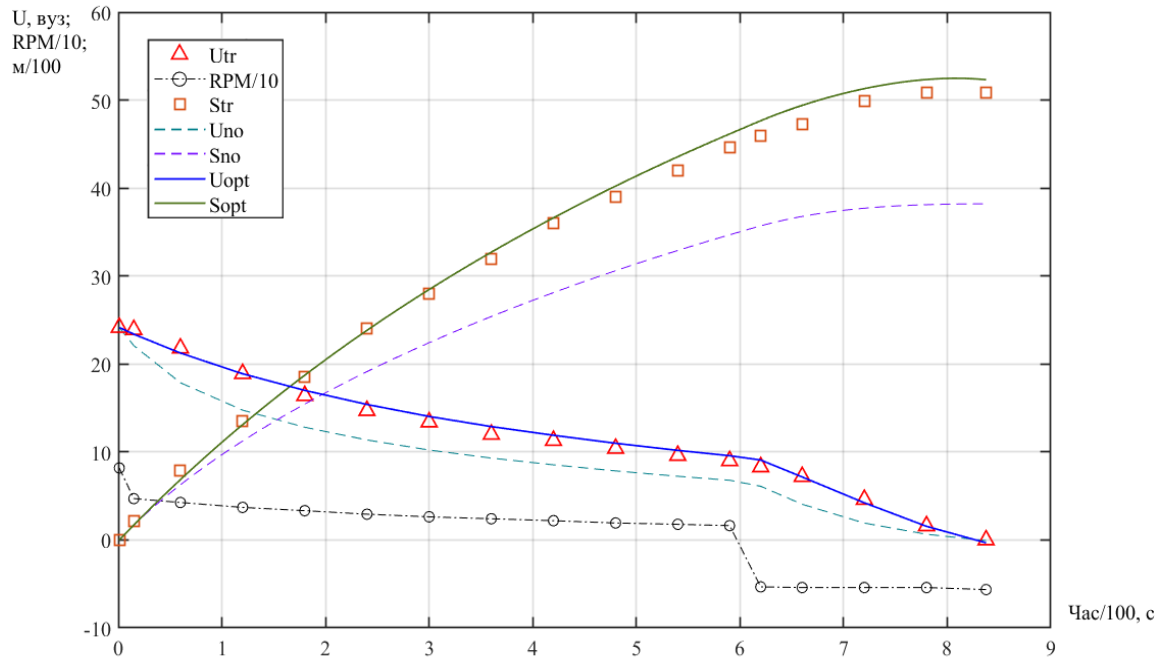


Рисунок 3.3 – Криві моделювання активного гальмування. U_{opt} , S_{opt} – результат уточнення; U_{tr} , S_{tr} – дані випробувань; U_{no} , S_{no} – початкові значення. $RPM/10$ – значення об/хв гвинта, зменшене в 10 разів

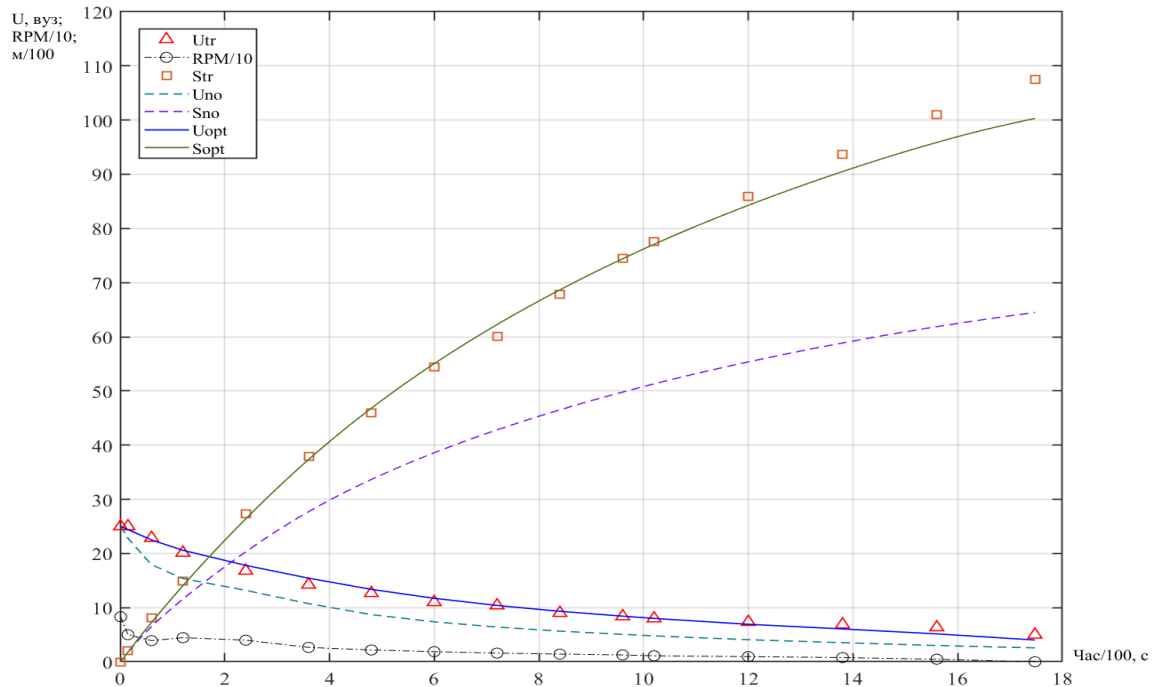


Рисунок 3.4 – Криві моделювання інерційного гальмування. U_{opt} , S_{opt} – результат уточнення; U_{tr} , S_{tr} – дані випробувань; U_{no} , S_{no} – початкові значення. $RPM/10$ – значення об/хв гвинта, зменшене в 10 разів

Таблиця 3.3 – Результати уточнення параметрів хідкості математичної моделі

Параметр	Умовне позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Розгін: Середнє відхилення швидкості	ΔU	вуз	0,08
Активне / інерційне гальмування: Середнє відхилення швидкості	ΔU_{CS} ΔU_D	вуз	0,44 0,37
Активне / інерційне гальмування: Відносна похибка розрахунку дистанції	ΔS_{CS} ΔS_D	% / м	0,15 / 7,43 0,06 / 6,63

Після налаштування параметрів хідкості судна, згідно до методики верифікації математичної моделі плоского руху судна, наступним кроком є уточнення таких параметрів маневреності судна, як поворотність та утримання на курсі, для яких типовими маневрами під час натурних випробувань є циркуляція та маневр «зигзаг» [156]. Дані параметрів для зазначених маневрів взято зі звіту випробувань MSC Nela [64], а значення відповідних коефіцієнтів опору можуть бути розраховані за емпіричними формулами [131].

З рис. 3.5 – 3.7 видно, що в результаті моделювання маневрів «зигзаг» та циркуляції на правий борт, ті криві, що базуються на розрахункових даних, значно відрізняються від тих, що базуються на даних з випробувань. Отримані похибки можуть бути обґрунтовані тим, що під час реальних випробувань диферент судна склав 6.34 м при середній осадці у 7.63 м, в той час, як експлуатаційна осадка судна може перевищувати це значення приблизно в два рази при майже нульовому диференті [156].

Таким чином, з метою отримання адекватної моделі, виникає необхідність в уточненні вказаних коефіцієнтів. На першому етапі було проведено уточнення за алгоритмом Нелдера–Міда, аналогічно до процедури проведеної для

налаштування хідкості моделі. При чому, пропонується виразити цільову функцію у наступному вигляді:

$$F = w_1 \cdot F(U_{TR}, U_O) + w_2 \cdot F(r_{TR}, r_O) + w_3 \cdot (F(A_{TR}, A_O) + F(D_{TR}, D_O)) + w_4 \cdot F(\Delta S) + w_5 \cdot F(\Delta \psi_{TR}, \Delta \psi_O), \quad (3.24)$$

де w_n – ваговий коефіцієнти, що дорівнюють 1; 180·60/π; 2; 1; 0.2.; індекс TR – дані випробувань; індекс O – дані розрахунків; U – швидкість при заданих оборотах гвинта; r – кутова швидкість; A – висув; D – тактичний діаметр циркуляції; ΔS – похибка позиції; $\Delta \psi$ – кут зарискування.

При чому:

$$F(U_{TR}, U_O) = \frac{\sum_{n=1}^N |U_{TRn} - U_{On}|}{N}, \quad (3.25)$$

$$F(r_{TR}, r_O) = \frac{\sum_{n=1}^N |r_{TRn} - r_{On}|}{N}, \quad (3.26)$$

$$F(A_{TR}, A_O) = \frac{A_{TR} - A_O}{A_{TR}}, \quad (3.27)$$

$$F(D_{TR}, D_O) = \frac{D_{TR} - D_O}{D_{TR}}, \quad (3.28)$$

$$F(\Delta S) = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta S}{N \cdot D_{TR}} = \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{(x_{TRn} - x_{On})^2 + (y_{TRn} - y_{On})^2}}{N \cdot D_{TR}}, \quad (3.29)$$

$$F(\Delta \psi_{TR}, \Delta \psi_O) = \left| \frac{\Delta \psi_{TR_1} - \Delta \psi_{O_1}}{\Delta \psi_{TR_1}} \right| + \left| \frac{\Delta \psi_{TR_2} - \Delta \psi_{O_2}}{\Delta \psi_{TR_2}} \right|, \quad (3.30)$$

де x, y – абсциса й ордината поточної точки кривої циркуляції судна.

Таким чином, алгоритм враховує наступні параметри для оцінки точності отриманих результатів:

- 1) для маневру циркуляції – швидкість, курс, відносні координати судна, висув, тактичний діаметр циркуляції;
- 2) для маневру «зигзаг 10/10» – значення першого та другого кутів зарискування.

Однак, слід зазначити, що в результаті багаторазового, а саме більше 10-ти ітерацій, повторення алгоритму, із заміною вхідних даних значень коефіцієнтів на оптимізовані у попередній ітерації значення, подальший розрахунок не надав ефективних результатів. Підлягаючі коригуванню коефіцієнти досягають певного порогу різниці значень, після якого їх зміна за одну ітерацію стає близькою до нуля. Отримані в результаті першого етапу криві маневрів зображені на рис. 3.5–3.7.

Слід відмітити, що хоча для маневру «зигзаг 10/10» вихідні параметри візуально співпадають з параметрами взятими з випробувань, для маневру циркуляції візуальна оцінка похибок не є задовільною і вимагає подальшого уточнення.

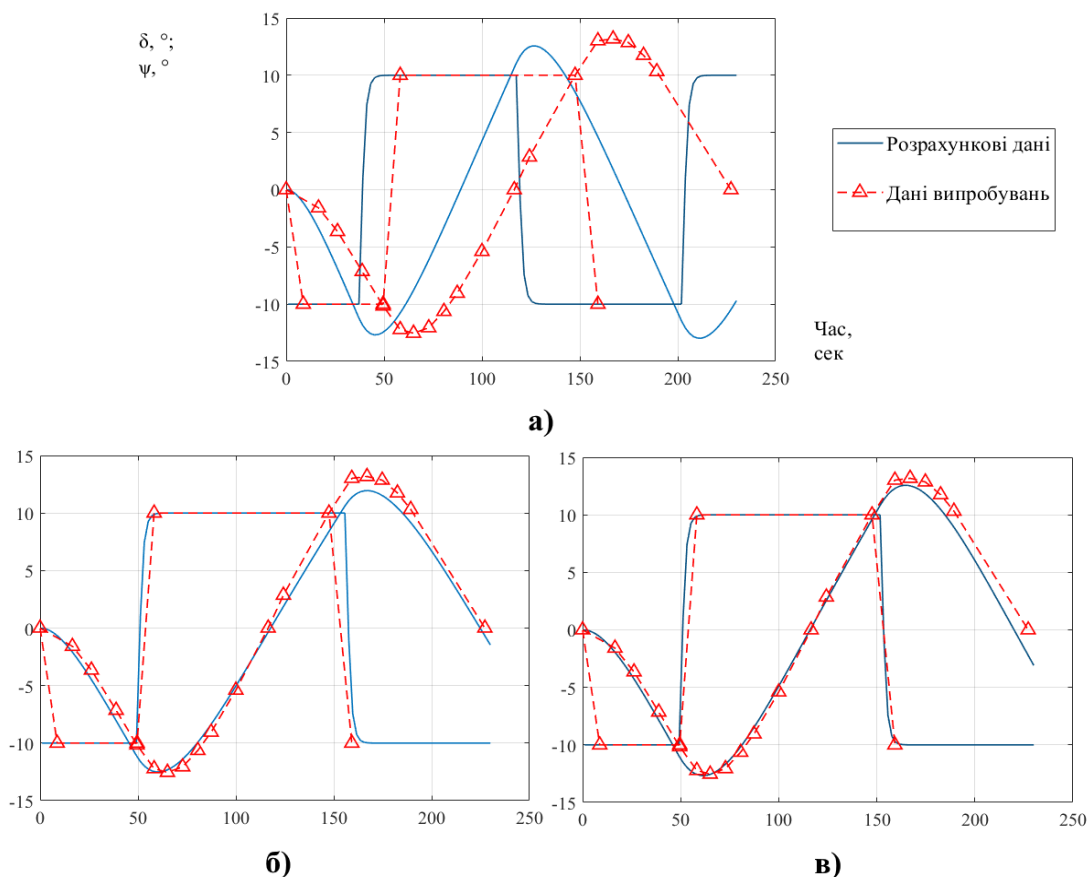


Рисунок 3.5 – Параметри утримання на курсі: моделювання маневру «зигзаг» 10/10. а – дані розраховані за формулами; б – перший етап уточнення моделі; в – другий етап уточнення моделі

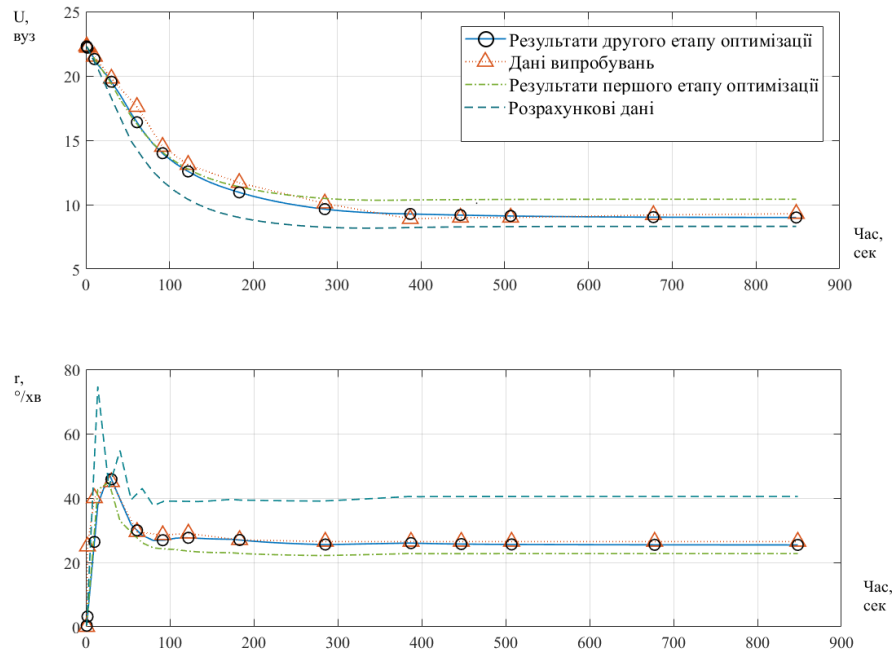


Рисунок 3.6 – Криві лінійної та кутової швидкостей маневру циркуляції на правий борт

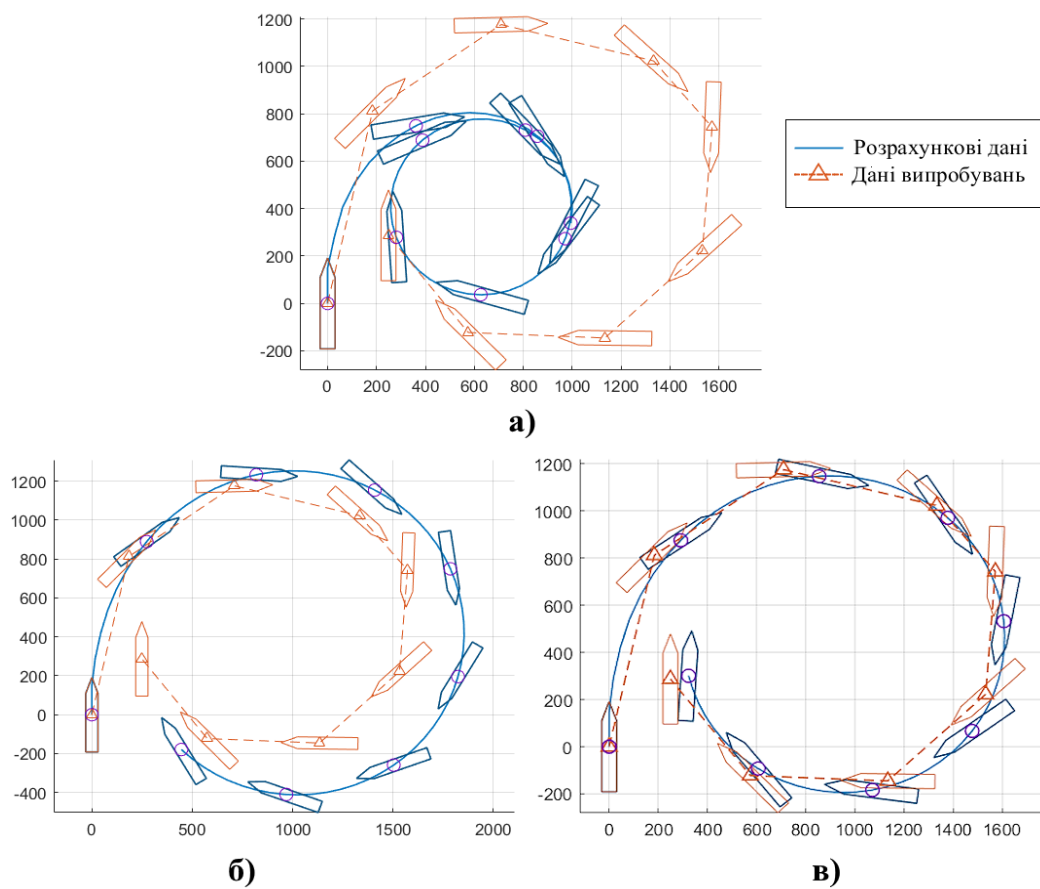


Рисунок 3.7 – Циркуляція на правий борт. а – дані розраховані за формулами; б – перший етап уточнення моделі; в – другий етап уточнення моделі

З метою мінімізації похибок, тобто для отримання адекватної відносно даних реальних випробувань моделі, доцільно додатково уточнити отримані в результаті алгоритму Нелдера–Міда коефіцієнти, застосувавши генетичний алгоритм оптимізації.

В результаті другого етапу уточнення, були істотно зменшені відхилення змодельованих параметрів циркуляції, що видно з рис. 3.6–3.7. Крім того, на рис. 3.5 візуально помітні покращення результатів уточнення розрахунку другого кута зарискування маневру «зигзаг 10/10». Отримані результати уточнення параметрів повороткості та утримання на курсі моделі судна зведені в табл. 3.4–3.5.

Таблиця 3.4 – Результати уточнення параметрів повороткості та утримання на курсі математичної моделі

Параметр	Розрахункове значення	1й етап уточнення	2й етап уточнення	Випробування
Висув, м	804,6	1193,8	1173,5	1176,1
Тактичний діаметр циркуляції, м	985,8	1844,7	1573,9	1572,2
Кут зарискування перший, °	2,7	2,5	2,5	2,5
Кут зарискування другий, °	2,5	1,9	3,0	3,2
СКВ позиції судна, м	360,1	131,1	31,4	—
СКВ курсу судна, °	58,4	22,4	10,5	—

Таблиця 3.5 – Результати уточнення значень коефіцієнтів

Коефіцієнти	Розрахункові	Уточнені (1й етап)	Уточнені (2й етап)
$X'vr$	-0,1207	-0,1242	-0,1207
$X'vv$	-0,0592	-0,0348	-0,3864
$X'rr$	-0,0009	-0,0014	0,0657
$X'vvvv$	0,3980	0,1981	0,3980
$Y'v$	0,2879	0,2350	0,5129
$Y'r$	0,1186	0,1188	0,1104
$Y'vvv$	1,6419	1,0519	-0,5978
$Y'rrr$	0,4712	0,0028	0,0005
$Y'vvr$	0,6552	0,4102	-0,1282
$Y'vrr$	0,0063	0,5889	0,2251
$N'v$	0,0165	0,0150	-0,0305
$N'r$	-0,0245	-0,0151	-0,0195
$N'vvv$	0,2046	0,2703	0,2257
$N'rrr$	-0,0297	-0,0479	-0,0160
$N'vvr$	-0,5971	-0,9728	-0,4362
$N'vrr$	0,0622	0,0558	-0,0057
a_H	0,3783	0,5262	0,0947
ε	0,9496	0,6862	0,7408
γ	0,3565	0,4353	0,0986

Беручи до уваги виконану послідовність дій, алгоритм уточнення аналітичної моделі руху судна, який використовується в межах представленої роботи, можна звести до блок-схеми, зображеної на рис. 3.8.

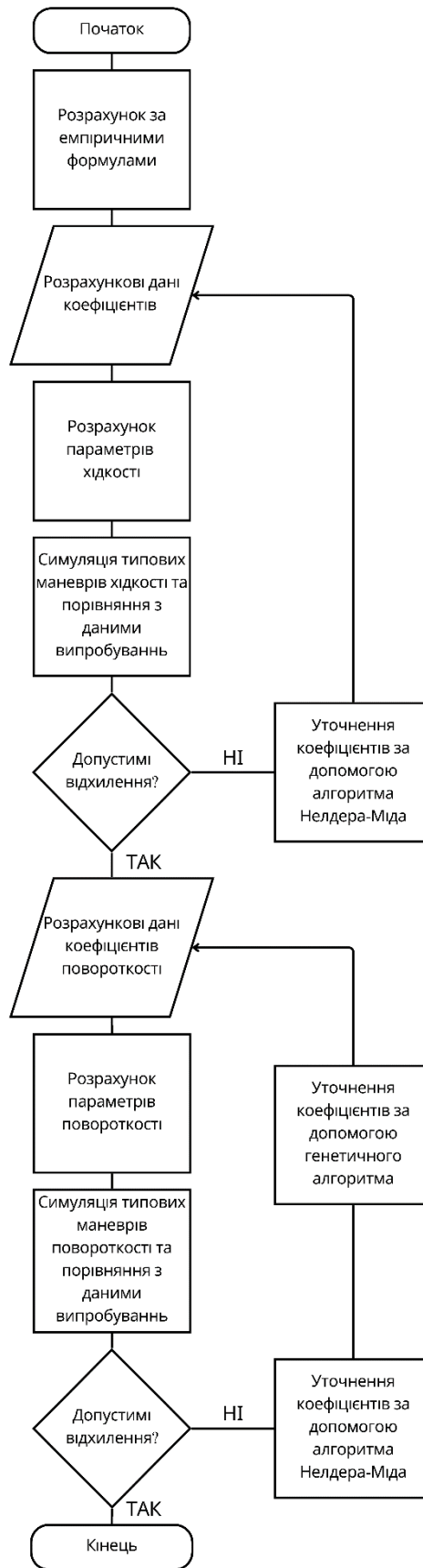


Рисунок 3.8 – Блок–схема алгоритму уточнення математичної моделі
плоского руху судна

В результаті трьохетапного уточнення коефіцієнтів, а саме: одинарного уточнення по параметрам хідкості та подвійного уточнення по параметрам повороткості – були отримані задовільні результати, з допустимими відхиленнями в межах даної роботи, щодо адекватності математичної моделі великотоннажного контейнеровозу даним випробувань.

3.3 Математичне моделювання взаємодії «Буксири ASD – контейнеровоз ULCS»

Оскільки для безпечного маневрування великотоннажних контейнеровозів в портових акваторіях, як правило, супровід буксиру є необхідним, а для безпеки судна–буксира необхідно враховувати його остійність, даний підрозділ присвячено математичному моделюванню взаємодії великотоннажного контейнеровоза та буксирів з кормовими азимутальними рушіями (далі – буксир ASD), які дозволяють безпечно маневрувати на швидкостях 4–8 вузлів. Буксири ASD широко досліджуються з точки зору моделювання та оцінки їх маневреності та ефективності в різних режимах, зокрема для спрощення отримання експериментальних даних для цілей суднобудування [66], [83]–[87], [90], [130]. У дослідженнях [6], [11], [12], [39], [39], [81], [82], [115] наведено математичну модель буксира з відображенням загальних сил, що діють на нього. Однак більш детальні дані, такі як розрахункові функції для окремих сил і коефіцієнтів, у згаданих дослідженнях не відображені.

Загалом математичні моделі динаміки буксира можна розділити на дві основні групи: що враховують лише рух по площині і що враховують як рух по площині, так і остійність. На сьогодні вимоги до остійності буксирів на міжнародному рівні не узгоджені, зокрема ті, що встановлені для буксирів меншого розміру та деякі вимоги до остійності буксирів не враховують аномальних сил, що можуть виникати на буксирній лінії [93]. Незважаючи на те, що класифікаційне товариство або держава прапора можуть регулювати мінімально необхідну інформацію про остійність, це не гарантує врахування

аномальних сил буксирування. Момент крену, який виникає під час буксирування, разом із прикладеним запасом міцності визначає остійність буксира. При буксируванні момент крену може бути створений:

1) Буксированим судном – протягування буксира, коли судно тягне буксир за буксирний трос з певною швидкістю і при певному курсі.

2) Буксиром – коли момент крену виникає внаслідок спільної дії стерн, гвинтів і сили буксирного тросу або гідродинамічної поперечної сили на корпус; вирішальними є сила упору або тяги буксира.

3) Спільним впливом як буксира, так і буксированого судна.

Таким чином, врахування обмежень маневреності буксира є необхідною умовою з точки зору безпеки спільного маневрування судна та буксира.

В загальному вигляді система рівнянь, що описує рух буксира на площині з врахуванням бортових коливань може бути визначена як [156]:

$$\begin{cases} X = (m + m_{11}) \cdot \dot{u} - (m + m_{22}) \cdot v \cdot r \\ Y = (m + m_{22}) \cdot \dot{v} + (m + m_{11}) \cdot u \cdot r \\ K = (I_{44} + J_{44}) \cdot \dot{p} \\ N = (I_{66} + J_{66}) \cdot \dot{r} + x_G \cdot Y \end{cases}, \quad (3.31)$$

де m – водотоннажність судна; m_{11} , m_{22} – приєднані маси; I_{44} , I_{66} – моменти інерції; J_{44} , J_{66} – приєднані моменти інерції; u , v – поздовжня та поперечна складові поступальної швидкості; p , r – кутові швидкості відносно поперечної та вертикальної осей відносно центру тяжіння (x_G) судна відповідно; X , Y , K , N – гідродинамічні сили і моменти, що діють на буксир.

У розгорнутому вигляді гідродинамічні сили і моменти можуть бути представлені наступним чином:

$$\begin{cases} X = X_H + X_P + X_{TL} \\ Y = Y_H + Y_P + Y_{TL} \\ K = K_H + K_P + K_{TL} + K_R \\ N = N_H + N_P + N_{TL} \end{cases}, \quad (3.32)$$

де індекси H – корпус; P – узагальнена сила групи гвинт–стерно; TL – натяг буксирного троса; R – відновлюючий момент і інерція.

Наступна система рівнянь визначає сили опору, що виникають на корпусі судна:

$$\begin{cases} X_H = \frac{1}{2} C_{HX}(u, \beta, r) \cdot \rho \cdot L \cdot d \cdot U^2 \\ Y_H = \frac{1}{2} C_{HY}(\beta, r) \cdot \rho \cdot L \cdot d \cdot U^2 \\ K = (z_H - z_G) \cdot Y_H \\ N_H = \frac{1}{2} C_{HN}(\beta, r) \cdot \rho \cdot L^2 \cdot d \cdot U^2 \end{cases}, \quad (3.33)$$

де C_H – коефіцієнти сил і моментів опору вздовж відповідних осей x та y ;

u – поздовжня складова швидкості судна;

β – кут дрейфу;

r – кутова швидкість повороту;

z_G – центр тяжіння вздовж вертикальної вісі;

z_H – центр зануреної частини корпусу судна вздовж вертикальної вісі.

Оскільки в процесі маневрування буксиру, азимутальні рушії можуть працювати асинхронно, доцільно враховувати сили для кожного з рушіїв окремо.

Сила упору гвинта може бути визначена як:

$$F_P = (1 - t_P) \cdot \rho \cdot D_P^4 \cdot K_T(J, \theta_P) \cdot n \cdot |n|, \quad (3.34)$$

де θ_P – кут розвороту лопатей гвинта.

Взаємний вплив гвинтів представимо у наступному вигляді [90], [93]:

$$F^*_{P} = C_{t\theta} \cdot F_P = F_P \cdot \left(C_t + \frac{(1 - C_t) \cdot \theta^3}{130 / C_t^3 + \theta^3} \right), \quad (3.35)$$

$$C_t = 1 - 0.8^{(lp/Dp)^{2/3}}, \quad (3.36)$$

де $C_{t\theta}$, C_t – коефіцієнт взаємодії гвинтів при $\theta > 0$ та $\theta = 0$ відповідно;

lp – відстань між гвинтами.

Таким чином, без урахування бічної сили, створюваної обертанням гвинта, сили упору рушіїв можна звести до наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} X_P = F_P^S \cdot \cos \delta_S + F_P^P \cdot \cos \delta_P \\ Y_P = F_P^S \cdot \sin \delta_S + F_P^P \cdot \sin \delta_P \\ K_P = (z_P - z_G) \cdot Y_P \\ N_P = x_P \cdot Y_P - y_P^S \cdot F_P^S \cdot \cos \delta_S - y_P^P \cdot F_P^P \cdot \cos \delta_P \end{cases}, \quad (3.37)$$

де x_P, y_P, z_P – координати відповідного гвинта.

Рівняння бортових коливань представимо у вигляді [156]:

$$K = a_{42} \cdot \dot{v}_G + b_{42} \cdot v_G + (I_{kk} + a_{44}) \cdot \dot{p}_G + b_{44} \cdot p_G + a_{46} \cdot \dot{r}_G + b_{46} \cdot r_G, \quad (3.38)$$

де a, b – коефіцієнти інерційних та демпфуючих сил відповідно; K – сумарний момент крену; індекси 1,2,3 – відповідають лінійним переміщенням вздовж поздовжньої, поперечної та вертикальної осей судна; індекси 4,5,6 – відповідають обертальним рухам крену, диференту та рискання судна.

Коефіцієнти інерційних і демпфуючих сил $a_{42}, a_{44}, a_{46}, b_{46}$ рівні нулю при теоретичній частоті хвилювання близької до нульового значення, та можуть бути визначені як [156]:

$$a_{42} = m_{42} + OG \cdot m_{22}, \quad (3.39)$$

$$a_{44} = m_{44} + m_{42} + OG \cdot (m_{24} + OG \cdot m_{22}), \quad (3.40)$$

$$a_{46} = (m_{42} + OG \cdot m_{22}) \cdot L, \quad (3.41)$$

$$b_{46} = -u \cdot (m_{42} + OG \cdot m_{22}), \quad (3.42)$$

де m_{jj} – коефіцієнти приєднаних мас; OG – довжина перпендикуляра від центру ваги до площини ватерлінії; L – довжина судна між перпендикулярами.

Коефіцієнт b_{44} представляє нелінійне в'язкісне демпфірування та може бути виражений незалежно від теоретичної частоти хвилювання наступним чином:

$$b_{44} = b_{44f}(\varphi_a, \omega_n, u) + b_{44l}(u), \quad (3.43)$$

де b_{44f} – коефіцієнт тертя; φ_a – амплітуда бортової качки; ω_n – частота бортових коливань; b_{44l} – підйомний коефіцієнт.

Таким чином, момент K_R можна представити як:

$$K_R = a_{42} \cdot \dot{v}_G - b_{44} \cdot p_G - a_{46} \cdot \dot{r}_G - b_{46} \cdot r_G - K_\varphi, \quad (3.44)$$

де K_φ – відновлюючий момент, що може бути розрахований за формулою [156]:

$$K_\varphi = m \cdot g \cdot l(\varphi), \quad (3.45)$$

де $l(\varphi)$ – плече статичної остійності, що залежить від кута крену.

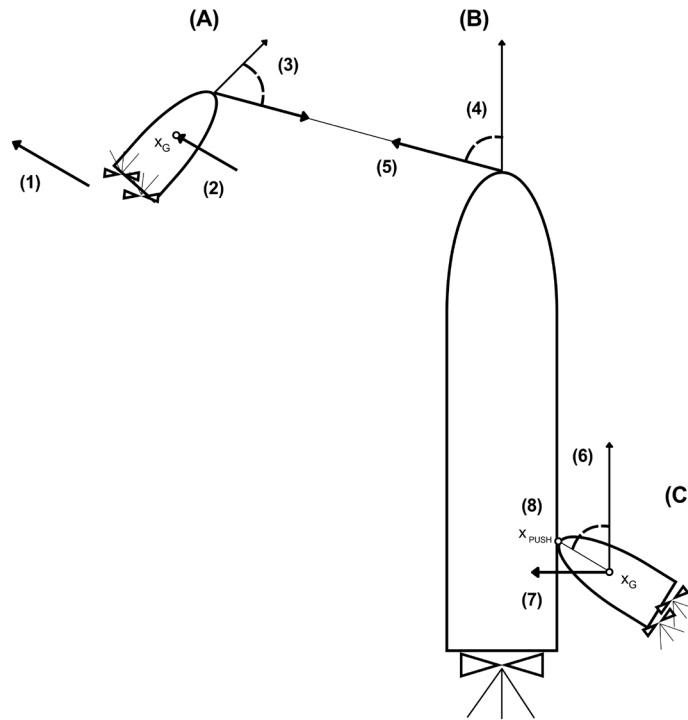


Рисунок 3.9 – Спрощена схема взаємодії судна та буксирів

На рис. 3.9 представлена спрощена схема взаємодії судна та двох буксирів: штовхаючого та тягового. На рис. 3.9: (А) Режим тягання; (1) Сумарний вектор упору ($\vec{F}_P > 0$); (2) Узагальнений вектор гідродинамічних сил на корпусі та сил інерції ($\vec{F}_H + \vec{F}_I$); (3) β_{PULL} – кут натягу буксирного троса (кут дрейфу корпусу буксира); (В) Судно, яке буксирується; (4) β_V – кут дрейфу корпусу судна; (5)

Вектор сили натягу буксирної лінії ($\vec{F}_{PULL} > 0$); (С) Режим штовхання; (6) β_{PUSH} – кут під яким буксир штовхає судно (кут дрейфу корпусу буксира); (7) Узагальнений вектор сил штовхання: корпус + упор при штовханні + сила реакції від штовхання ($\vec{F}_H + \vec{F}_P + \vec{F}_R$); (8) x_{PUSH} – точка прикладання сили при штовханні.

Математична модель натягу буксирного троса, представлена в цій роботі, не враховує його пружність. Розрахунок натягу буксирної лінії починається після досягнення її заданої довжини, при цьому не враховується пружність. Натяг \vec{F}_{PULL} дорівнює нулю, при відстані між точками кріплення буксирного троса на судні та буксирі менше заданої довжини.

Швидкості буксира і буксированого об'єкта зрівнюються внаслідок ривка в момент досягнення буксиром довжини буксирувального троса. Для усунення ефекту «розтягування» вводиться кінематична умова, згідно з якою, якщо швидкість подовження буксирної лінії перевищує нуль при досягненні максимальної довжини, її значення віднімається від швидкості буксира по відповідних осях [156].

Для передачі зусилля буксира на натягнутий трос, вектор результуючої сили \vec{R} , створюваної буксиром, повинен бути відмінним від нуля і діяти в напрямку від буксированого судна.

$\vec{F}_{PULL X} = 0$, якщо:

$$\begin{cases} \vec{R}_X < 0 \wedge \beta_{PULL} \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \wedge x_{PULL} < 0 \\ \vec{R}_X > 0 \wedge \left(\beta_{PULL} > \frac{\pi}{2} \vee \beta_{PULL} < -\frac{\pi}{2}\right) \wedge x_{PULL} \geq 0 \end{cases}, \quad (3.46)$$

$\vec{F}_{PULL Y} = 0$, якщо:

$$\begin{cases} \vec{R}_Y < 0 \wedge \beta_{PULL} \in (-\pi; 0) \\ \vec{R}_Y > 0 \wedge \beta_{PULL} \in (0; \pi) \end{cases}, \quad (3.47)$$

де \vec{F}_{PULLX} , \vec{F}_{PULLY} – поздовжня і поперечна складові вектора сили натягу троса; \vec{R}_X , \vec{R}_Y – поздовжня і поперечна складові вектора рівнодіючої сили \vec{R} ; β_{PULL} – кут натягу буксирного троса; x_{PULL} – координата точки кріплення буксирної лінії.

Поздовжня і поперечна складові вектора \vec{R} рівнодіючої сили передаються на буксирний трос уздовж його напрямку, створюючи натяг \vec{F}_{PULL} :

$$F_{PULLX} = |\vec{R}_X| \cdot \cos \beta_{PULL}, \quad (3.48)$$

$$F_{PULLY} = |\vec{R}_Y| \cdot \sin \beta_{PULL}, \quad (3.49)$$

$$\vec{F}_{PULL} = \vec{F}_{PULLX} + \vec{F}_{PULLY} + \vec{F}_{PULLV}, \quad (3.50)$$

де \vec{F}_{PULLV} – додаткова сила натягу, що створюється буксированим судном.

Таким чином, система рівнянь результуючої сили може бути подана у наступному вигляді:

$$\begin{cases} X_{PULL} = |\vec{F}_{PULL}| \cdot \cos \beta_{PULL} \\ Y_{PULL} = |\vec{F}_{PULL}| \cdot \sin \beta_{PULL} \\ N_{PULL} = Y_{PULL} \cdot x_{PULL} \\ K_{PULL} = Y_{PULL} \cdot (z_{PULL} - z_G) \end{cases}, \quad (3.51)$$

Для системи з декількома буксирами, що тягнуть судно, рівняння (3.51) матиме наступний вигляд для опису результуючої сили:

$$\begin{cases} X_{PULLN} = \sum_{n=1}^N |\vec{F}_{PULL}| \cdot \cos \beta_{PULL} \\ Y_{PULLN} = \sum_{n=1}^N |\vec{F}_{PULL}| \cdot \sin \beta_{PULL} \\ N_{PULLN} = \sum_{n=1}^N Y_{PULL} \cdot x_{PULL} \\ K_{PULLN} = \sum_{n=1}^N Y_{PULL} \cdot (z_{PULL} - z_G) \end{cases}, \quad (3.52)$$

де N – загальна кількість буксирів, які беруть участь у буксируванні;

n – кількість буксирів (від 1 до N).

Розрахунок штовхальної сили починається з моменту досягнення буксиром кінематичної межі – корпусу судна. Для передачі штовхальної сили буксира на корпус об'єкта результуюча сила, створювана буксиром, повинна бути позитивною, діяти в напрямку буксируваного об'єкта, а відстань між корпусами буксира та об'єкта повинна бути рівною до нуля: $x_{PUSH} = 0$.

$\vec{F}_{PUSHX} = 0$, якщо:

$$\begin{cases} \vec{R}_X < 0 \wedge \beta_{PUSH} \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \wedge x_{PUSH} = 0 \\ \vec{R}_X > 0 \wedge \beta_{PUSH} \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \wedge x_{PUSH} > 0 \end{cases}, \quad (3.53)$$

$\vec{F}_{PUSHY} = 0$, якщо:

$$\begin{cases} \vec{R}_Y < 0 \wedge \beta_{PUSH} \in (-\pi; 0) \\ \vec{R}_Y > 0 \wedge \beta_{PUSH} \in (0; \pi) \end{cases}, \quad (3.54)$$

де \vec{F}_{PUSHX} , \vec{F}_{PUSHY} – поздовжня і поперечна складові сили штовхання;

\vec{R}_X , \vec{R}_Y – поздовжня і поперечна складові вектора рівнодіючої \vec{R} ;

β_{PUSH} – кут прикладання штовхаючої сили,

x_{PUSH} – координата точки прикладання штовхаючої сили.

$$F_{PUSHX} = |\vec{R}_X| \cdot \cos \beta_{PUSH}, \quad (3.55)$$

$$F_{PUSHY} = |\vec{R}_Y| \cdot \sin \beta_{PUSH}, \quad (3.56)$$

$$\vec{F}_{PUSH} = \vec{F}_{PUSHX} + \vec{F}_{PUSHY} + \vec{F}_{PUSHT}, \quad (3.57)$$

де \vec{F}_{PUSHT} – сила взаємодії буксирування.

У даному випадку, система рівнянь результуючої сили може бути подана у наступному вигляді:

$$\begin{cases} X_{PUSH} = \overline{F_{PUSH}} \cdot \cos \beta_{PUSH} \\ Y_{PUSH} = \overline{F_{PUSH}} \cdot \sin \beta_{PUSH} \\ N_{PUSH} = Y_{PUSH} \cdot x_{PUSH} \\ K_{PUSH} = Y_{PUSH} \cdot (z_{PUSH} - z_G) \end{cases}, \quad (3.58)$$

Для системи декількох буксирів задіяних в операціях буксирування та штовхання, результуюча сила матиме вигляд:

$$\begin{cases} X_{PN} = \sum_{n=1}^N (X_{PULLn} + X_{PUSHn}) \\ Y_{PN} = \sum_{n=1}^N (Y_{PULLn} + Y_{PUSHn}) \\ N_{PN} = \sum_{n=1}^N (N_{PULLn} + N_{PUSHn}) \\ K_{PN} = \sum_{n=1}^N (K_{PULLn} + K_{PUSHn}) \end{cases}, \quad (3.59)$$

де N – загальна кількість буксирів, які беруть участь у буксируванні;

n – кількість буксирів (від 1 до N).

Враховуючи результуючі сил буксирування рівняння (3.2) набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} X = X_H + X_P + X_R + X_{PN} \\ Y = Y_H + Y_R + Y_{PN} \\ N = N_H + N_R + N_{PN} \end{cases}, \quad (3.60)$$

3.4 Імітаційне моделювання взаємодії буксирів ASD та великотоннажного контейнеровозу

В межах даного дослідження, для відтворення запропонованого алгоритму взаємодії між буксирами і великотоннажним контейнеровозом було використано ПЗ MATLAB R2024a. Моделювання руху контейнеровозу представлено в пп. 3.1–3.2 даного розділу. В основі суден–буксирів з азимутальними рушіями

лежить математична модель буксиру, яка була попередньо звірена з аналогічними моделями буксирів тренажеру Transas Navi-Trainer 4000 Одеського морського тренажерного центру, що представлено в роботах [90], [156]. Основні характеристики буксиру зведено до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6– Характеристики буксиру ASD

Параметр	Умовне позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Довжина найбільша	L	м	32,5
Ширина	B	м	10,8
Осадка	d	м	4,6
Дифферент		м	0
Тягове зусилля		т	50
Коефіцієнт повноти	Cb		0,548
Об’ємна водотоннажність	m	м ³	969262
Діаметр гвинта	Dp	м	2,544
Площа пера стерна	Ar	м ²	7,623
Коефіцієнт опору	X_0		–0,1274

Моделювання виконання буксиром маневру циркуляції на правий та лівий борт представлено на рис. 3.10 та рис. 3.11. відповідно. Моделювання виконане на максимальній ходовій швидкості 14,4 вузли та з кутом повороту рушіїв 35°. За таких умов тактичні діаметри циркуляцій складають 124 м та 123 м для повороту на правий та лівий борт відповідно. Як було зазначено вище, попередня верифікація моделі була проведена у роботах [90], [156].

Відповідно до алгоритму моделювання взаємодії буксирів та контейнеровозу, описаного в попередньому пункті даного розділу, були проведені поетапні моделювання, а саме:

- 1) режим тягання судна, що буксирується;
- 2) режим штовхання судна, що буксирується;
- 3) спільна робота буксирів, коли один з буксирів тягне, а інший штовхає судно, що буксирується.

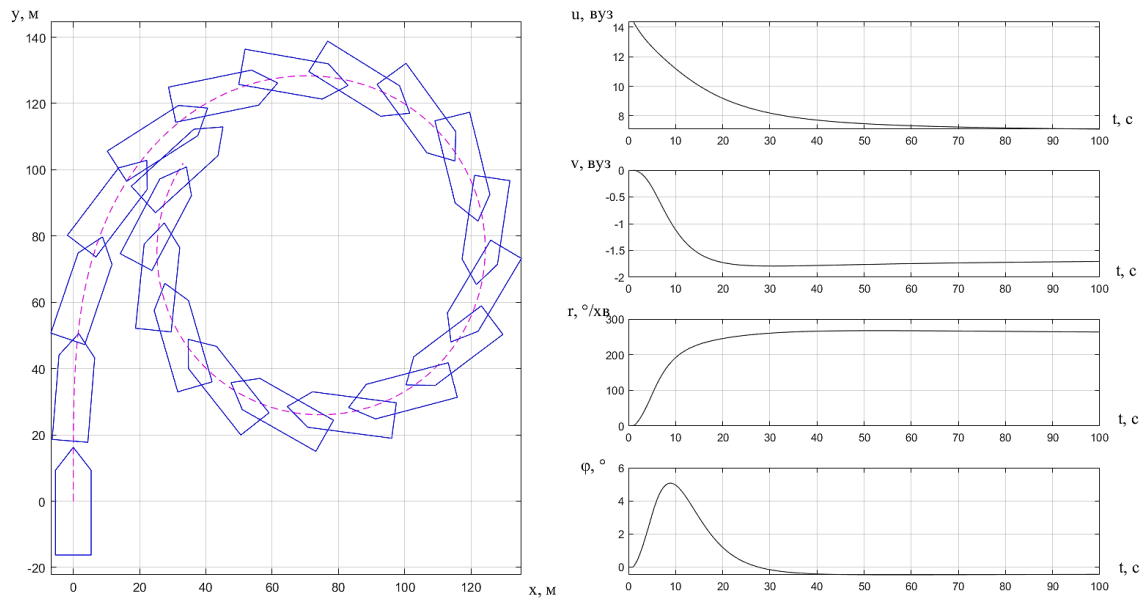


Рисунок 3.10 – Модель буксиру з азимутальними руш'ями: маневр циркуляції на правий борт 35°

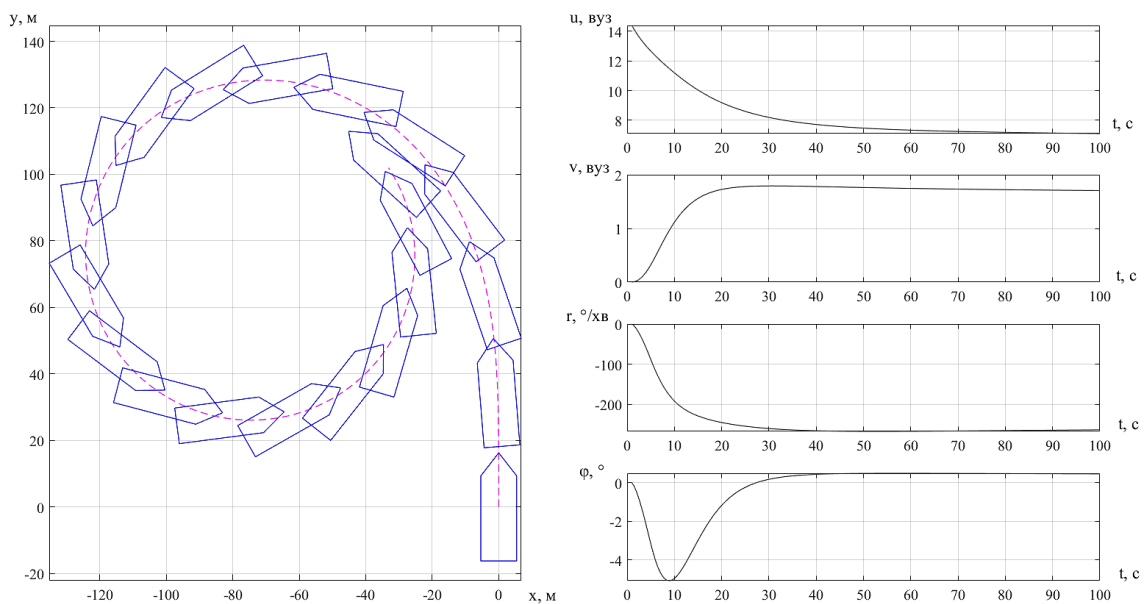


Рисунок 3.11 – Модель буксиру з азимутальними руш'ями: маневр циркуляції на лівий борт 35°

На рис. 3.12–3.14 представлені результати перших двох етапів моделювання взаємодії моделей буксира з азимутальними рушіями та великотоннажного контейнеровозу в режимі тягання та штовхання з урахуванням бортових коливань буксира відповідно до рівнянь (3.38–3.45), за різних початкових умов, а саме: швидкість та курс судна–буксира, довжина тросу, кут натягу буксирного тросу, швидкість та курс судна, що буксирується. Рис. 3.12а відображує маневрування «корма до корми», при чому судно, що буксирується, не має ходу, а буксир рухається зі швидкістю 6 вузлів. Рис. 3.12б відображує маневрування «нос до носу», при чому судно, що буксирується, рухається зі швидкістю 2 вузли, а судно–буксир рухається зі швидкістю 8 вузлів.

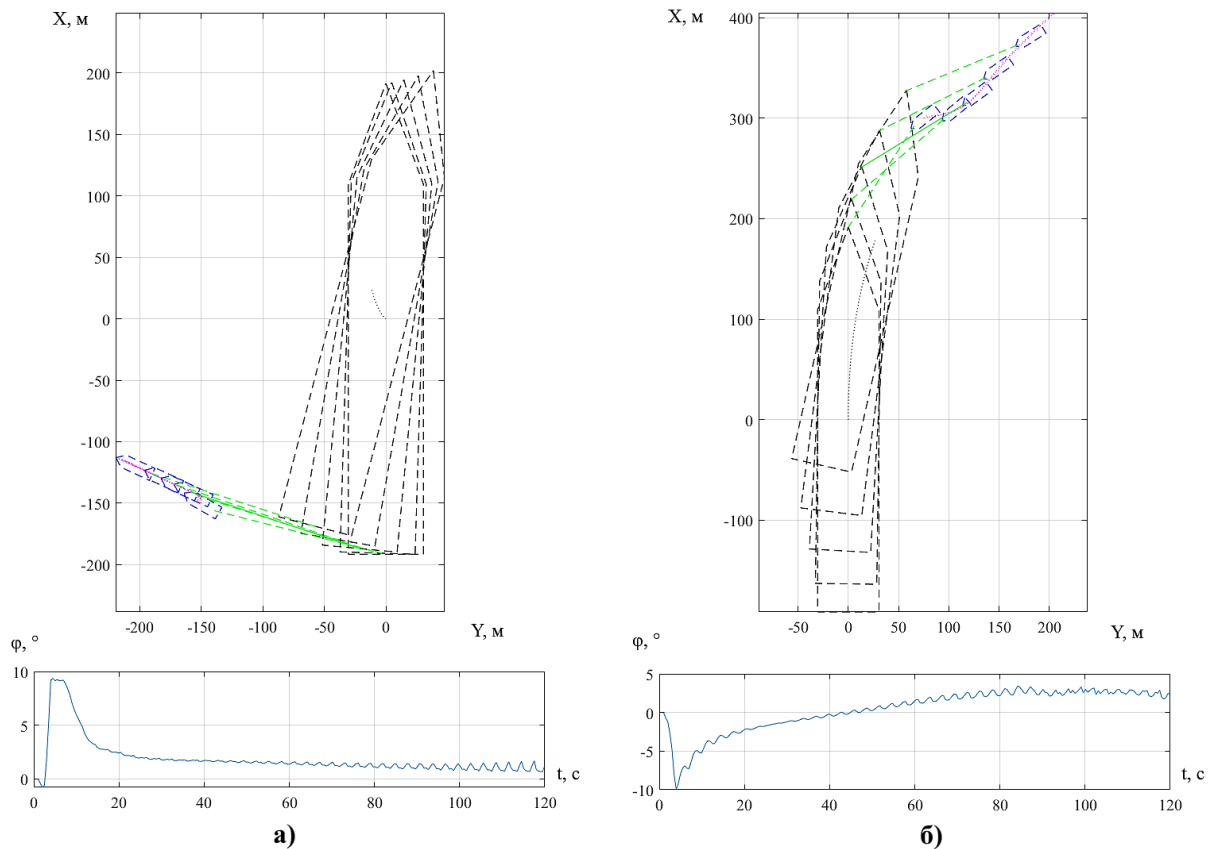


Рисунок 3.12 – Моделювання взаємодії буксира ASD та контейнеровоза ULCS у режимі тягання: а – «корма до корми», швидкість – 6 вузлів; б – «нос до носа», швидкість – 8 вузлів

На рис. 3.14. відтворені результати моделювання режиму штовхання, для якого, в межах ПЗ, перевірка моменту досягнення буксиром корпусу судна відбувається шляхом перевірки перетину відрізків. В обох випадках кути крену буксиру ϕ мають допустимі значення.

Небезпечна ситуація перекидання, або гіртингу, буксиру змодельована на рис. 3.13. З рисунка видно, що кут крену перевищує значення кута затоплення 60 градусів, через момент створюваний від сили натягу буксирного тросу та сили упору гвинтів.

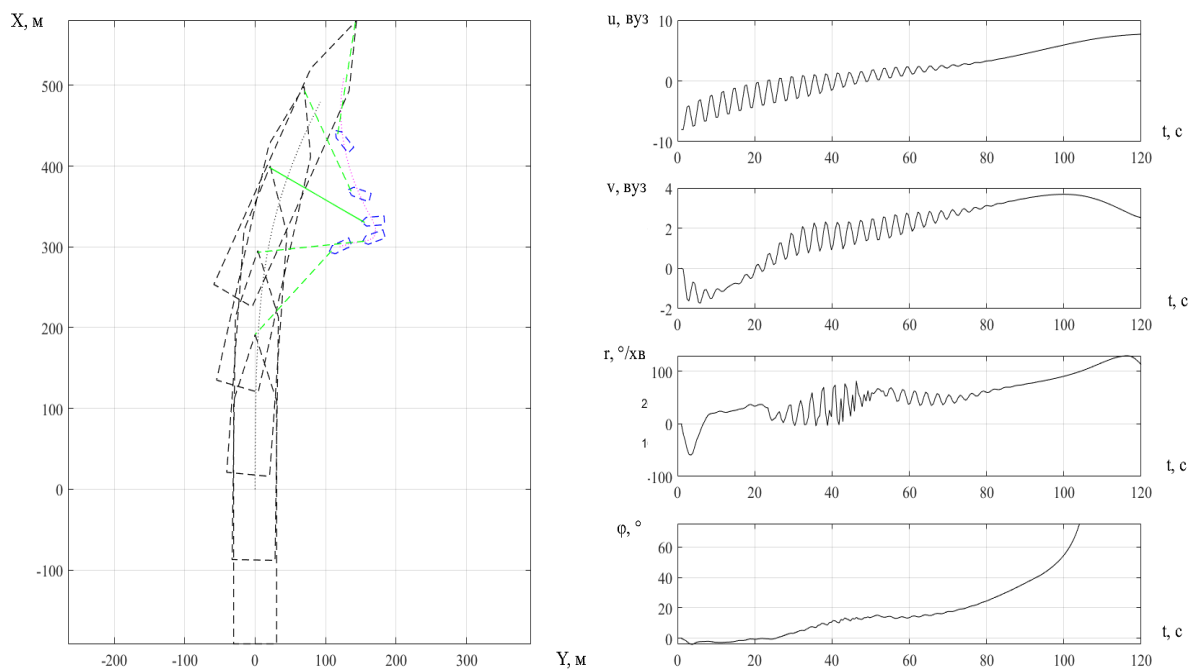


Рисунок 3.13 – Моделювання взаємодії буксира ASD та контейнеровоза ULCS у режимі тягання – ситуація гіртинг, «нос до носа», швидкість буксира та судна 6 вузлів

В результаті перших двох етапів моделювання були отримані адекватні моделі поведінки штовхання та тягання буксирів з азимутальними рушіями, які були об'єднані на третьому етапі в єдину модель взаємодії двох буксирів та судна–контейнеровоза.

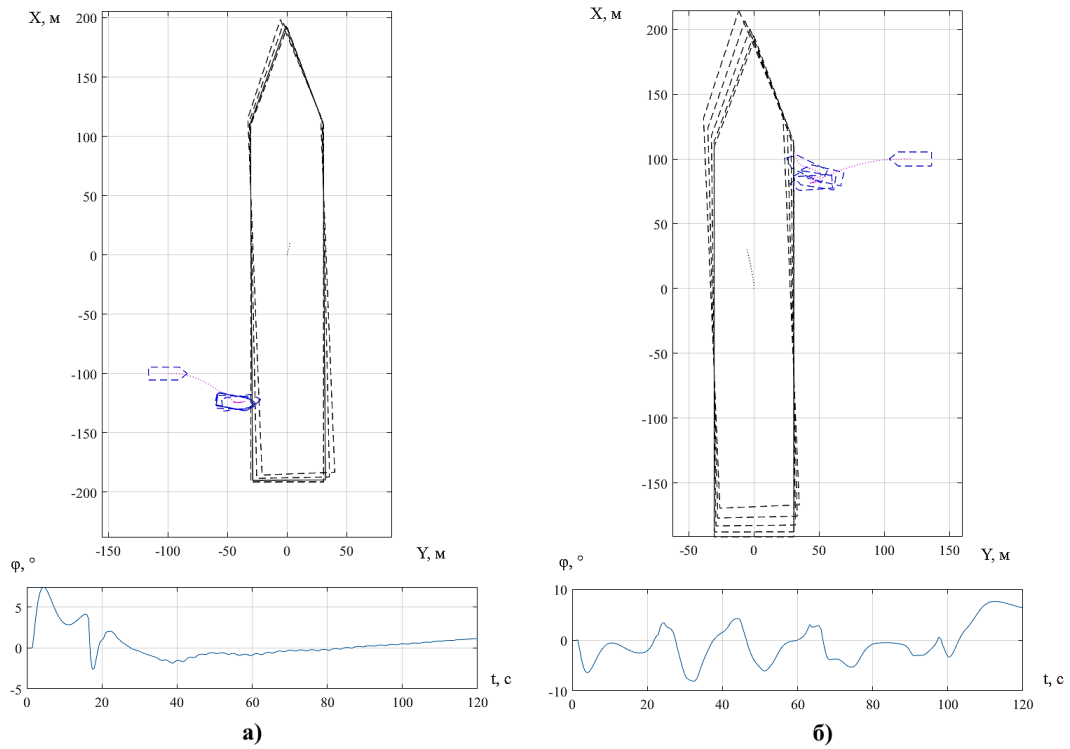


Рисунок 3.14 – Моделювання взаємодії буксира ASD та контейнеровоза ULCS у режимі штовхання: а – з лівої чверті, швидкість – 6 вузлів; б – з правої скули, швидкість – 8 вузлів

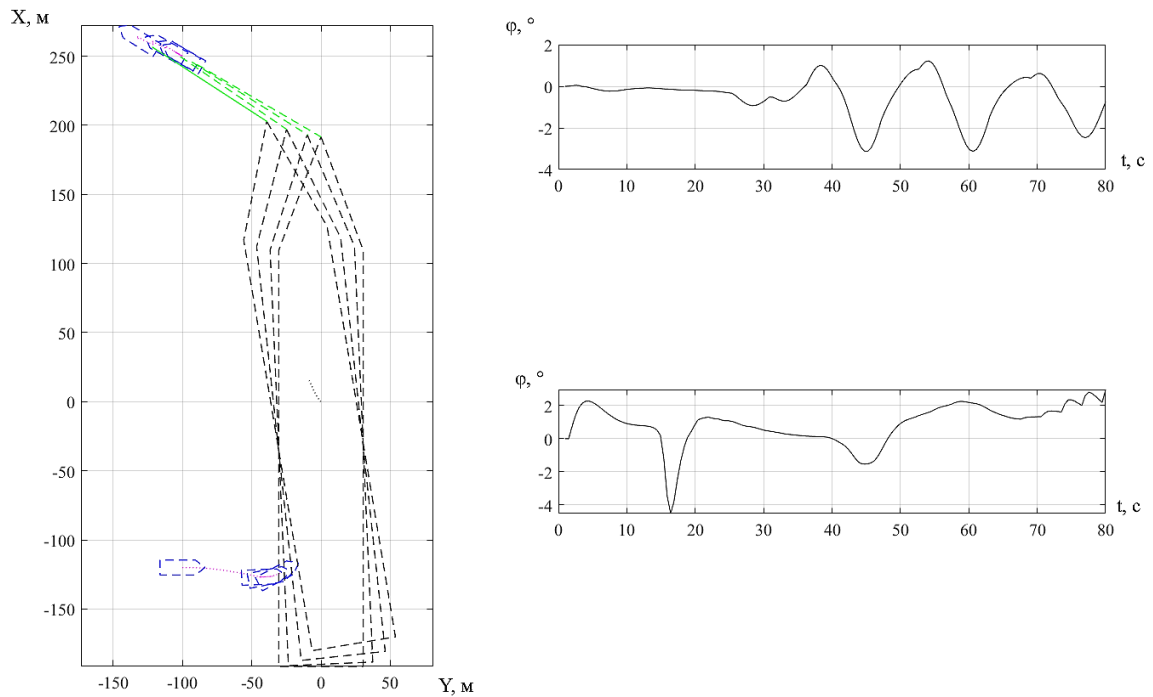


Рисунок 3.15 – Моделювання взаємодії буксирів ASD та контейнеровоза ULCS у режимі тягання та штовхання: швидкість – 8 вузлів та 6 вузлів

На рис. 3.15 відображено моделювання маневрування контейнеровозу з двома буксирами, один з яких закріплений в носовій частині судна зі швидкістю 8 вузлів, інший штовхає у ліву чверть зі швидкістю 6 вузлів, при цьому судно, що буксирується не має ходу. З графіків кутів крену видно, що значення нахилів мінімальні.

В результаті дослідження можна виділити деякі критичні особливості взаємодії буксиру та судна в режимі тягання з точки зору безпеки судноплавства [93].

У режимі буксирування «корма–нос»:

- режим синхронного керування без обмежень може призвести до перекидання;
- асинхронний режим керування без обмежень може призвести до великих кутів крену;
- доцільно залишити один азимутальний рушій для штовхання, а інший для керування;
- при швидкості, близької до 8 вузлів, азимути рушіїв повинні бути обмежені 40–50 градусами;
- курс буксиру повинен бути близьким (± 10 градусів) до курсу буксированого судна на швидкості не менше 4 вузлів;
- при вищій швидкості буксир зазнає більші кути крену. При 4 вузлах з одним рушієм, що штовхає вбік, крен може досягати 15 градусів.

У режимі буксирування «нос до носа»:

- при швидкості, близької до 8 вузлів, азимути рушіїв можуть бути повернуті на 80 градусів, якщо курс буксира збігається з курсом судна;
- курс буксиру не повинен перевищувати різницю в ± 40 градусів порівняно з курсом буксированого судна;
- при вищій швидкості буксир зазнає більші кути крену, коли курс буксира відрізняється від курсу судна.

3.5 Висновки до третього розділу

З точки зору маневрування, найбільш критичні етапи навігації пов'язані з перевантаженими районами, такими як річки, гавані, канали тощо, де лоцманські та буксирні послуги є обов'язковими та забезпечуються місцевими правилами. В межах портових акваторій великотоннажні контейнеровози значно обмежені в можливості ефективно маневрувати без залучення буксирів.

В даному розділі була представлена математична модель плоского руху великотоннажного контейнеровозу, яка була верифікована за допомогою даних випробувань. В результаті уточнення гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі за даними випробувань отримано вдосконалену методику верифікації математичної моделі плоского руху судна, яка відрізняється алгоритмом застосування методів оптимізації, що дозволяє отримувати більш надійні результати при уточненні гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за даними морських випробувань.

В результаті математичного моделювання процесу взаємодії судна з буксирами з урахуванням обмежень маневреності буксирів отримано вдосконалену математичну модель взаємодії судна з буксиром. Ця модель відрізняється врахуванням результуючих сил і моментів, коли в процесі маневрування беруть участь кілька буксирів, що працюють в різних режимах роботи. Результати моделювання також дозволили сформулювати деякі рекомендації для запобігання перекиданню буксирів, які можуть бути застосовані для планування та моніторингу спільного маневрування судна та буксирів.

Зміст даного розділу викладено в роботах [42], [48], [93], [93].

РОЗДІЛ 4. ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ СУДНА

4.1 Сучасні методи прогнозування траєкторії руху суден

Прогнозування траєкторій суден є важливою областю досліджень, спрямованих на підвищення ефективності та безпеки морського судноплавства. Нещодавні досягнення в обчислювальній техніці та якості даних значно розширили застосування машинного навчання в морському секторі, особливо в області прогнозування положення судна [7]. Сучасні дослідження здебільшого спрямовані на короткострокове прогнозування траєкторії з головним фокусом на уникненні зіткнень і управлінні в районах із завантаженим рухом суден. Крім того, зростає кількість робіт, присвячених довгостроковому прогнозуванню напрямків суден. В даному підрозділі наведено огляд відповідних досліджень прогнозування траєкторії руху судна та досліджуються подальші потенційні напрямки в цій галузі.

Як правило, алгоритми, розроблені для прогнозування траєкторії, використовують історичні дані системи автоматичної ідентифікації AIS разом із зовнішніми факторами, такими як метеорологічні умови та інші відповідні змінні. Методи, які використовуються для прогнозування траєкторії судна, можна розділити на два основні типи:

- 1) методи на основі кінематичних моделей.
- 2) методи, що використовують алгоритми навчання нейронних мереж.

Методи на основі кінематичних (статистичних) моделей є найпоширенішим методом прогнозування траєкторії судна. Даний підхід передбачає побудову ймовірнісних або регресійних моделей на основі історичних даних з метою виконання статистичного аналізу для прогнозування майбутніх траєкторій руху суден. Для розрахунку прогнозованої траєкторії обчислюються та використовуються такі параметри, як середнє значення, дисперсія та частотний розподіл даних траєкторії. Типові статистичні моделі використовують лінійну

регресію, фільтр Калмана та ARIMA (автоматичне регресійне інтегроване ковзне середнє). Як правило, при такому підході передбачається існування кореляцій і закономірностей між потенційними майбутніми траєкторіями та минулими траєкторіями, фіксуючи ці зв'язки за допомогою статистичного аналізу. Статистичні методи особливо підходять для прогнозування шляхів суден на короткі відстані.

Методи, що використовують алгоритми навчання нейронних мереж, в свою чергу, можна розділити на дві групи:

- 1) класичний підхід машинного навчання;
- 2) нейронні мережі глибокого навчання.

В межах класичного підходу машинного навчання, алгоритм передбачає навчання нейронної мережі, моделювання історичних даних траєкторії судна для отримання необхідного набору характеристик і створення прогнозів. В даному випадку першим кроком стає необхідність початкового проектування функцій, що передбачає вибір і вилучення функцій, пов'язаних із прогнозуванням траєкторії, таких як позиція, швидкість, прискорення та курс. Після чого, використовуючи ряд змінних, що включає тип судна, навігаційне середовище судна, погодні умови та ін., отримані функції підлягають навчанню за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Методи, засновані на глибокому навчанні нейронних мереж, використовуються для вивчення та моделювання великих історичних траєкторних даних суден та здатні обробляти послідовні дані та дозволяють вилучати та моделювати надійні функції для розрахунку прогнозованих траєкторій. Наприклад, рекурентні нейронні мережі (RNN - Recurrent neural network) та їх варіанти, такі як мережа з довготривало–короткочасною пам'яттю (LSTM – Long short–term memory) і мережа зі стробованим рекурентним блоком (GRU – Gated recurrent unit), можуть виконувати часове моделювання даних траєкторії для фіксації довготривалих залежностей і нелінійних зв'язків між серіями даних, що дозволяє досягти більш точного прогнозування. Такі методи

особливо підходять для довгострокового та великомасштабного прогнозування траєкторії.

Таким чином, методи, засновані на кінематичних моделях, вимагають побудови рівняння передачі стану для опису динаміки руху [111]. В дослідженні [53] було використано дискретний фільтр Калмана для оцінки послідовності траєкторії зниклого судна. Розширений фільтр Калмана для прогнозування майбутнього положення судна шляхом встановлення матриці переходів станів був використаний в дослідженні [79]. В статтях [137], [29] була розроблена модель переходу стану на основі прихованої моделі Маркова, використовуючи ланцюг Маркова для оцінки майбутнього положення судна. Шляхом інтегрування датчиків для підвищення точності, в роботі [57] автори досягли середньої похибки передбачення менше 5 км за п'яти годинний період.

Однак, представлені методи мають певні обмеження. По–перше, побудова кінематичної моделі є складною через вплив зовнішніх факторів. По–друге, ці методи не вирішують проблему моделювання безперервного руху суден.

В області розвитку моделей штучних нейронних мереж, в роботах [10], [114] були об'єднані дані з кількох джерел на основі даних AIS, досягнувши вищої точності передбачення за допомогою LSTM та підходу керованих даних. В дослідженні [56] стратегія розрахунку траєкторій була розділена на два етапи: спочатку використовували методи кластеризації для захоплення особливостей траєкторії, а потім LSTM, що дозволила підвищити точність. У роботі [58] досягли підвищення продуктивності моделі простої опорної векторної машини (SVM – Support Vector Machine), оптимізувавши параметри моделі за допомогою адаптивного диференціального алгоритму еволюції хаосу, що призвело до середньої похибки прогнозування менше 33,41 метра протягом 60 секунд. Дослідження [110] присвячено використанню нейронної мережі GRU для підвищення ефективності обчислень, зберігаючи при цьому точність прогнозування, порівнянну з LSTM.

Незважаючи на значний прогрес у прогнозуванні траєкторії судна, існуючі методи мають обмеження. На практиці на поведінку судна впливає не тільки його власні параметри, але й відносне положення інших суден поблизу. Хоча ці методи добре працюють у прогнозуванні траєкторії одного судна у відкритих водах, їх ефективність погіршується у сценаріях з завантаженим потоком суден. Крім того, сучасні методи часто використовують евклідову відстань між фактичною та прогнозованою траєкторіями як функцію втрат, що змушує модель вивчати «середню поведінку» навчальних даних, нехтуючи «поведінкою уникнення» суден у реальних зіткненнях.

Для вирішення вказаної проблеми була використана генеративна змагальна мережа (GAN – Generative Adversarial Network): модель розрізняє характеристики власного руху, такі як швидкість, прискорення та положення окремого судна, і особливості групового руху, зокрема відносну швидкість і прискорення кількох суден, з подальшим використанням багатопарового перцептронну для зміни форми даних і прогнозування майбутніх траєкторій [125].

Кілька досліджень були зосереджені на кластеризації історичних траєкторій і подальшій класифікації суден на групи. В роботі [139] автори ініціювали дослідження, використовуючи схожість траєкторій поточних та минулих рейсів для прогнозування позиції судна, використовуючи метод кластеризації на основі щільності для створення історичної бази даних траєкторій судна, з метою подальшого аналізу подібності траєкторій, пропонуючи стратегії прийняття рішень на основі оброблених даних. В статті [132] була запропонована модель стекування для прогнозування місцеположення судна, яка об'єднує статичну модель, засновану на історичних даних, і динамічну модель, що використовує інформацію про поточну траєкторію. У цьому дослідженні міра подібності визначається як середня найкоротша поверхнева відстань між траєкторіями, яка потім використовується для прогнозування місця призначення судна. В дослідженні [73], [74] автор запровадив методологію вилучення маршрутів руху та виявлення аномалій (TREAD – Traffic route detection and anomaly detection),

яка об'єднує всі історичні траєкторії в межах певного регіону для визначення маршрутів руху та класифікації часткових траєкторій для виявлення аномалій. Цей метод також оцінює ймовірність розташування на маршруті. Однак техніка TREAD згруповує точки входу, шляхові точки та стаціонарні точки в межах визначеного регіону, що може призвести до того, що траєкторії зі значними відмінностями між підтраєкторіями будуть згруповані разом. Для уникнення зіткнень необхідна розрахунки більшої точності, що вимагає більш точного розрізнення між траєкторіями.

Інші дослідження кластеризації та класифікації [140], [141] використовували динамічне викривлення часу та алгоритм Дугласа–Пьюкера для кластеризації траєкторій, а також кластеризацію k -середніх для класифікації поведінки судна. Методи, засновані на динамічному викривленні часу та кластеризації маршрутних точок, групують траєкторії на основі подібної просторової поведінки, але інваріантні до часу. Отже, траєкторії з подібними просторовими формами згруповані разом, незважаючи на різну поведінку в різний час, що може перешкоджати наступним прогнозам траєкторії, зосереджуючись виключно на формах траєкторії, ігноруючи їхню тривалість і відмінності підтраєкторії.

Підхід прогнозування траєкторії з використанням даних AIS через байєсівську мережу з фільтром частинок, призначений для прогнозування протягом кількох годин був запропонований у [67]. Слабкою стороною даного дослідження можна вказати обмеженість його використання для уникнення зіткнень через довготривале прогнозування.

У дослідженні [103] запроваджено імовірнісний метод прогнозування траєкторії з використанням моделі процесу Гаусса, який не тільки передбачає майбутнє положення судна, але й забезпечує оцінку невизначеності. Незважаючи на те, що цей метод показав гарні результати для звичайних траєкторій біля узбережжя Португалії, він не був застосований для більш складних навігаційних ситуацій і траєкторій, які могли б погіршити його продуктивність.

У статті [7] представлено комплексну оцінку різних підходів до прогнозування траєкторій суден з використанням історичних даних AIS. Дослідження підкреслює значну ефективність і практичне застосування методів глибокого навчання для вдосконалення систем морського руху шляхом пом'якшення навігаційних ризиків і підвищення ефективності управління рухом.

4.2 Побудова алгоритму прогнозування траєкторії на основі математичної моделі руху судна

Виходячи з огляду літератури, представленого в попередньому пункті, видно, що прогнозування траєкторії судна передбачає дотримання фізичних законів і певних моделей руху. Як правило, це передбачення спирається на мінімальний набір динамічних параметрів, включаючи положення судна, швидкість та курс. Історичні дані про рух охоплюють довготу, широту, швидкість і курс, де довгота і широта визначають форму траєкторії, а швидкість і курс ілюструють динаміку руху.

Помітним обмеженням цієї методології є її неспроможність врахувати унікальні характеристики маневрування, притаманні кожному типу та класу судна. Цей недогляд часто призводить до менш точних прогнозів, особливо під час маневрів у портових районах, де навігаційна поведінка може суттєво відрізнятися між різними суднами та за різних зовнішніх умов. Крім того, цей підхід накладає значні обчислювальні вимоги, що призводить до збільшення часу навчання для нейронних мереж. Це пов'язано з нестачею та неточністю вхідних даних через відсутність комплексної математичної моделі руху судна.

Таким чином, виникає необхідність розробити алгоритм прогнозування траєкторії судна, який базується на надійній математичній моделі. У такий спосіб, алгоритм має включати не тільки такі динамічні параметри як курс і швидкість судна, але й кількість обертів гвинта за хвилину, кут повороту стерна, режим підрулюючого пристрою, поточну осадку судна. Крім того, статичні параметри судна повинні враховуватися від ініціалізації моделі та протягом

усього алгоритму. Також цей підхід дозволить досягти безперервного розрахунку траєкторії судна для будь-якого інтервалу часу та з будь-яким кроком моделювання, оскільки усувається необхідність обробки історичних даних траєкторії. Ще одна перевага запропонованого алгоритму полягає в тому, що він позбавляє потреби обробляти траєкторії суден-цілей, проблеми, розглянутої в дослідженні [125], оскільки фіксуються фактичні значення гвинто-стернової групи.

Оскільки в межах даного дослідження розглядається безпека маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях, доцільно виділити вплив вітрових навантажень W на маневрування, а також дрейф від течії C . Звідси, з одного боку, прогнозована траєкторія PT (predicted trajectory) може бути представлена у вигляді матриці координат судна:

$$PT = \begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_i \\ y_1 & \dots & y_i \\ \psi_1 & \dots & \psi_i \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

де i – кількість точок в масиві розрахованих координат; x – абсциса поточної точки; y – ордината поточної точки; ψ – курс судна.

У третьому розділі представлена та уточнена математична модель руху великотоннажного контейнеровоза. Отже при формулюванні алгоритму прогнозування траєкторії судна, доцільно спиратися на ті змінні параметри, які задаються оператором судна, а також на поточні значення курсу, швидкості, кутової швидкості та координат судна. За цих умов, з іншого боку, прогнозовану траєкторію також можна виразити як наступну функцію залежності:

$$PT = f(U, \psi, r, x, y, \delta, n, t, step, W, C), \quad (4.2)$$

де U – поточна швидкість судна; ψ – курс судна; r – кутова швидкість судна; x – абсциса поточної точки; y – ордината поточної точки; δ – поточний кут перекладки стерна; n – кількість оборотів гвинта за хвилину; t – період

прогнозування траєкторії; *step* – крок відображення прогнозованих траєкторних точок; W – сили та моменти, викликані впливом вітрових навантажень; C – дрейф, викликаний впливом течії.

Враховуючи вплив вітру, рівняння (3.2) подаємо у наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R + X_W \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_W \\ N &= N_H + N_R + N_W \end{aligned} \right\}, \quad (4.3)$$

де X_W , Y_W , N_W – сили та момент вітрового навантаження, які наближено можна розрахувати за методом, представленим у дослідженні [8]:

$$\left. \begin{aligned} X_W &= \frac{1}{2} \cdot C_X \cdot \rho_a \cdot V_W^2 \cdot A_F \\ Y_W &= \frac{1}{2} \cdot C_Y \cdot \rho_a \cdot V_W^2 \cdot A_L \\ N_W &= \frac{1}{2} \cdot C_N \cdot \rho_a \cdot V_W^2 \cdot A_L \cdot L \end{aligned} \right\}, \quad (4.4)$$

де C_X , C_Y – коефіцієнти поздовжньої та поперечної складових сили; C_N – коефіцієнт моменту ривання відповідно; ρ_a – щільність повітря; V_W – відносна швидкість вітру; A_F , A_L – площі фронтальної проекції та бічної площини судна; L – довжина судна.

Коефіцієнти C_X , C_Y , C_N можуть бути розраховані за наступними формулами [9]:

$$C_X = -CD_1 \cdot \frac{A_L}{A_F} \cdot \frac{\cos \varepsilon}{1 - \frac{\delta_W}{2} \left(1 - \frac{CD_1}{CD_t} \right) \cdot \sin^2 2\varepsilon}, \quad (4.5)$$

$$C_Y = CD_t \cdot \frac{\sin \varepsilon}{1 - \frac{\delta_W}{2} \left(1 - \frac{CD_1}{CD_t} \right) \cdot \sin^2 2\varepsilon}, \quad (4.6)$$

$$C_N = C_Y \times \left[\frac{s_L}{L} - 0.18 \left(\varepsilon - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (4.7)$$

де ε – відносний (видимий) кут вітру; CD_L , CD_t — коефіцієнти поздовжнього та бокового опору судна відповідно; δ_W – параметр поперечної сили; s_L – положення центру мас бічної площини щодо основного перерізу.

Референтні значення коефіцієнтів можна взяти з таблиці, наведеної в роботі [9]. Для контейнерного типу судна: $CD_L = 0.90$, $CD_t = 0.55$; $\delta_W = 0.40$.

Облік дрейфу від течії спрощено розраховується шляхом додавання компонентів вектора швидкості течії до компонентів вектора швидкості судна:

$$\left. \begin{aligned} u_C &= U_C \cdot \cos(\psi - set) \\ v_C &= U_C \cdot \sin(\psi - set) \end{aligned} \right\}, \quad (4.8)$$

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \left(u_{(i-1)} + \dot{u}_i \cdot step \right) + u_C \\ v_i &= \left(v_{(i-1)} + \dot{v}_i \cdot step \right) + v_C \end{aligned} \right\}, \quad (4.9)$$

де u_C , v_C – поздовжня та поперечна складові швидкості течії; U_C – швидкість течії, м/с; set – напрямок течії, рад; i – поточна ітерація в циклі розрахунку прогнозованої траєкторії.

Таким чином, алгоритм прогнозування траєкторії на основі математичної моделі передбачає збір статичних даних судна, його динамічних даних (U , r , n , δ , ψ , x , y), зовнішніх динамічних даних (параметрів вітру та течії), а також мінімальних налаштувань оператора (t , $step$). Отримані дані формують оновлену базу даних для розрахунку прогнозованих координат та курсу за допомогою математичної моделі руху судна. Блок-схема виконання запропонованого алгоритму представлена на рис. 4.1.

З метою спрощення процесу математичного моделювання модель була побудована за допомогою програмного забезпечення MATLAB Simulink, базуючись на дослідженнях [96], [156]. Загальна схема зображена на рис. 4.2.

Слід зазначити, що поточні значення курсу, прямолінійної і кутової швидкостей судна, та його координат входять до блоку розрахунку математичної моделі. Вихідні дані $step$, t , PT використовуються у відповідній програмі

(скрипті) для відображення прогнозованої траєкторії, що виконується після завершення обчислень.



Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритму розрахунку прогнозованої траєкторії на основі математичної моделі

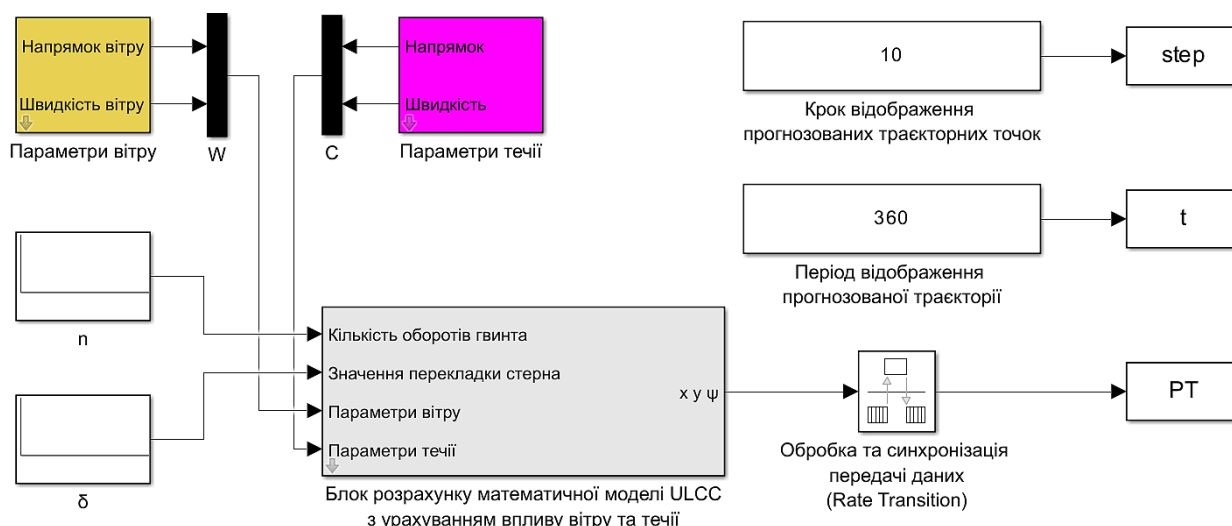


Рисунок 4.2 – Математична модель розрахунку прогнозованої траєкторії на основі математичної моделі ULCC в MATLAB Simulink R2024a

На рис. 4.3 наведено приклади розрахунків прогнозованих траєкторій судна, отримані на основі запропонованого алгоритму, заснованого на математичній моделі великотоннажного контейнеровозу. Для наведених на рис. 4.3 прикладів, початкова позиція судна знаходиться в координатах (0,0), з курсовим кутом (ψ) 000° і кутом стерна (δ) 0° . Для представлених сценаріїв швидкість вітру складає 25 вузлів.

На рис. 4.3 (А) зображено передбачувану траєкторію судна, що слідує в режимі Dead Slow Astern ($n = 19$ об/хв) зі швидкістю 2 вузли. Справжній напрямок вітру 150° .

Рисунок 4.3 (Б) ілюструє передбачувану траєкторію для судна, що рухається в режимі Dead Slow Astern ($n = 19$ об/хв) зі швидкістю 2 вузли. Справжній напрямок вітру 45° .

На рис. 4.3 (В) показана прогнозована траєкторія для судна, що працює в режимі Dead Slow Ahead ($n = 19$ об/хв) зі швидкістю 5,9 вузлів. Справжній напрямок вітру 270° .

На рис. 4.3 (Г) представлена прогнозована траєкторія руху судна в режимі Dead Slow Ahead ($n = 19$ об/хв) зі швидкістю 5,9 вузлів. Справжній напрямок вітру 45° .

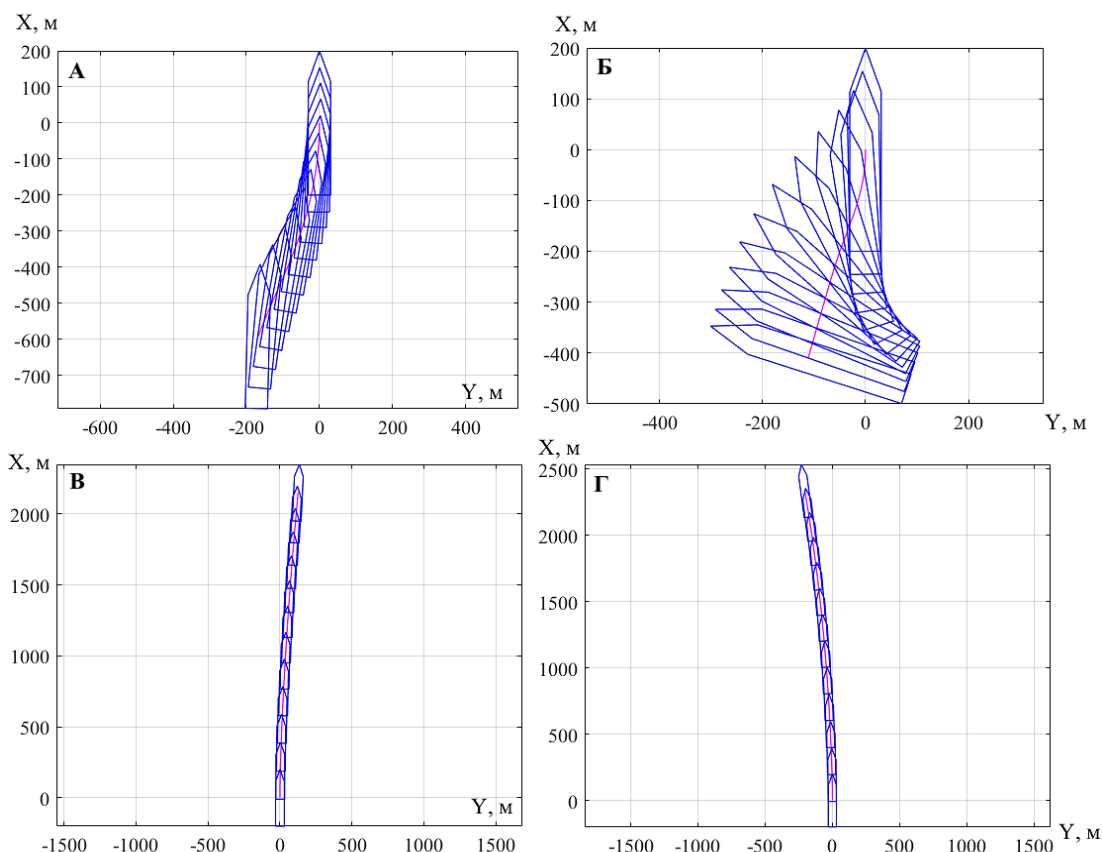


Рисунок 4.3 – Результати розрахунків прогнозованої траєкторії великотоннажного контейнеровозу з урахуванням вітрових навантажень

Результати моделювання демонструють, що алгоритм прогнозує поведінку судна за різних заданих умов. Слід підкреслити, що в цьому контексті задача прогнозування траєкторії може привести до підвищення безпеки судноплавства в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування надвеликих суден у портових акваторіях, що може бути досягнуто наступними способами:

1) впровадження в освітніх навігаційних симуляторах: шляхом включення алгоритму в навчальні навігаційні симулятори судноводії можуть отримати досвід маневрування великотоннажними контейнеровозами в різних сценаріях. Таке практичне навчання на тренажерах може зменшити ризик помилок під час виконання реальних рейсів;

2) симуляція сценаріїв маневрування з буксирами: для випадків коли судно не може підтримувати курс без допомоги буксирів можливо визначити ефективні

стратегії буксирування для утримання великотоннажного контейнеровозу на курсі;

3) реалізація в суднових системах підтримки прийняття рішень.

4.3 Побудова алгоритму прогнозування траєкторії на основі математичної моделі взаємодії судна з буксирами

Щоб удосконалити алгоритм, необхідно використовувати математичну модель, що описує взаємодію між буксирами і судном, як описано в розділах 3.3 і 3.4.

Враховуючи сили буксирування, функція залежності прогнозованої траєкторії набуде вигляду:

$$PT = f(U_t, \psi_t, r_t, x_t, y_t, \delta_t, n_t, x_v, x_{PUSH}, W, C), \quad (4.10)$$

Де U_t – швидкість руху буксира; ψ_t – курс буксиру; r_t – кутова швидкість буксиру; x_t – абсциса поточної точки; y_t – ордината поточної точки; δ_t – поточний кут перекладки стерна; n_t – кількість оборотів гвинта за хвилину; x_t – точка кріплення буксирної лінії на буксирі; x_v – точка кріплення буксирної лінії на судні; x_{PUSH} – точка прикладання штовхаючої сили.

Так, рівняння руху судна (3.59) може бути подане у наступній формі:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R + X_W + X_{PN} \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_W + Y_{PN} \\ N &= N_H + N_R + N_W + N_{PN} \end{aligned} \right\}, \quad (4.11)$$

Розширений алгоритм прогнозування траєкторії на основі математичної моделі з урахуванням взаємодії буксирів та судна передбачає збір статичних даних судна й буксирів, їх динамічних даних, зовнішніх динамічних даних (параметрів вітру та течії), а також мінімальних налаштувань оператора ($t, step$). Отримані дані формують оновлену базу даних для розрахунку прогнозованих

координат та курсу за допомогою математичної моделі взаємодії судна і буксирів. Блок-схема виконання запропонованого алгоритму представлена на рис. 4.4.

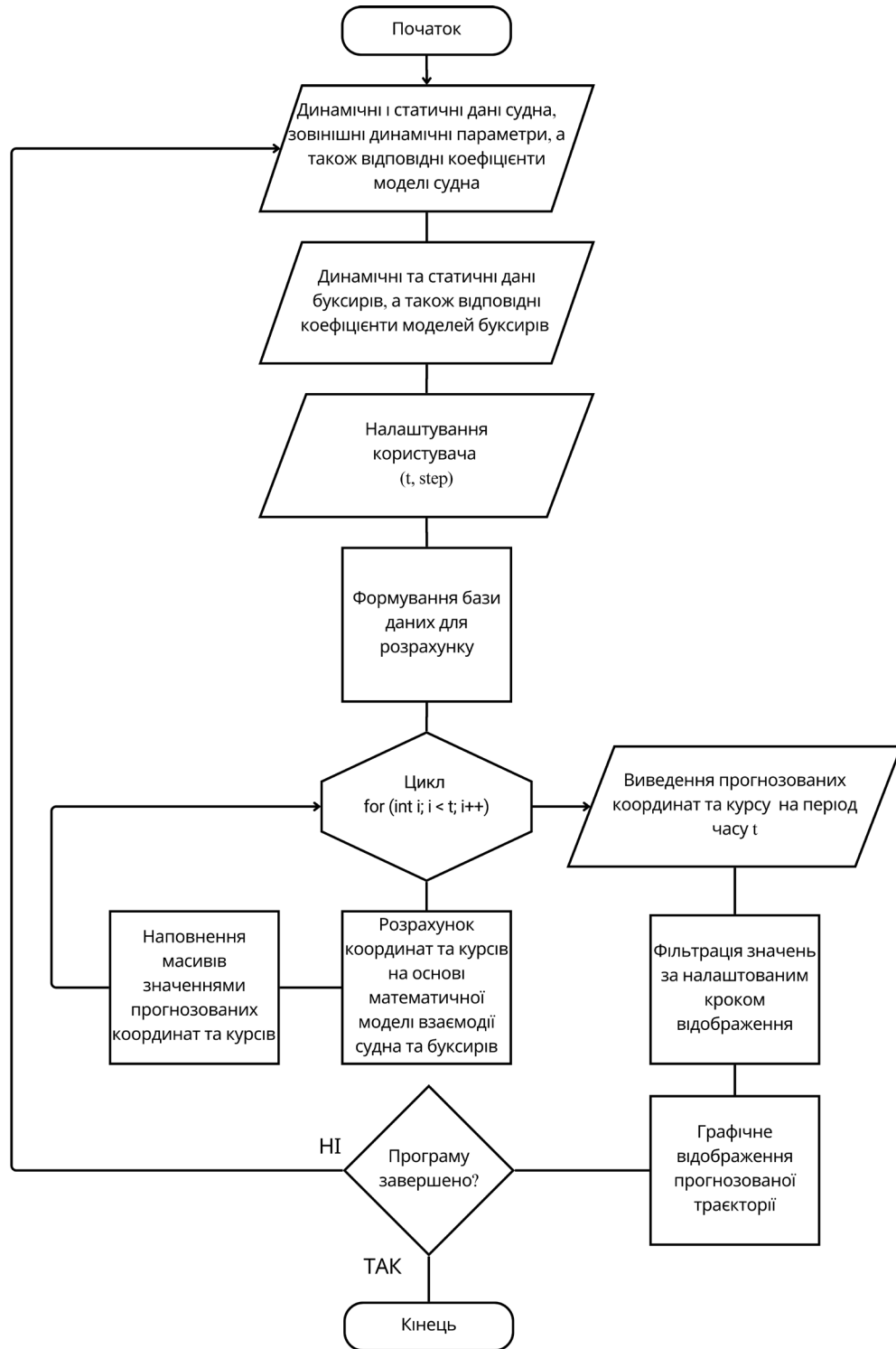


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритму розрахунку прогнозованої траєкторії на основі математичної моделі взаємодії судна і буксирів

В результаті розрахунку прогнозованої траєкторії для судна та буксирів можна отримати масив координат для усіх залучених суден та графічно їх відтворити як показано нижче. Таким чином можна попередньо оцінити ефективність маневру, та за необхідністю скоригувати його.

На рис. 4.5 схематично зображено розширену математичну модель для прогнозування траєкторії. Ця модель включає блок вхідних параметрів як штовхаючих, так і тягових буксирів, що полегшує подальший розрахунок результуючих сил і моментів, що виникають у результаті взаємодії між суднами.

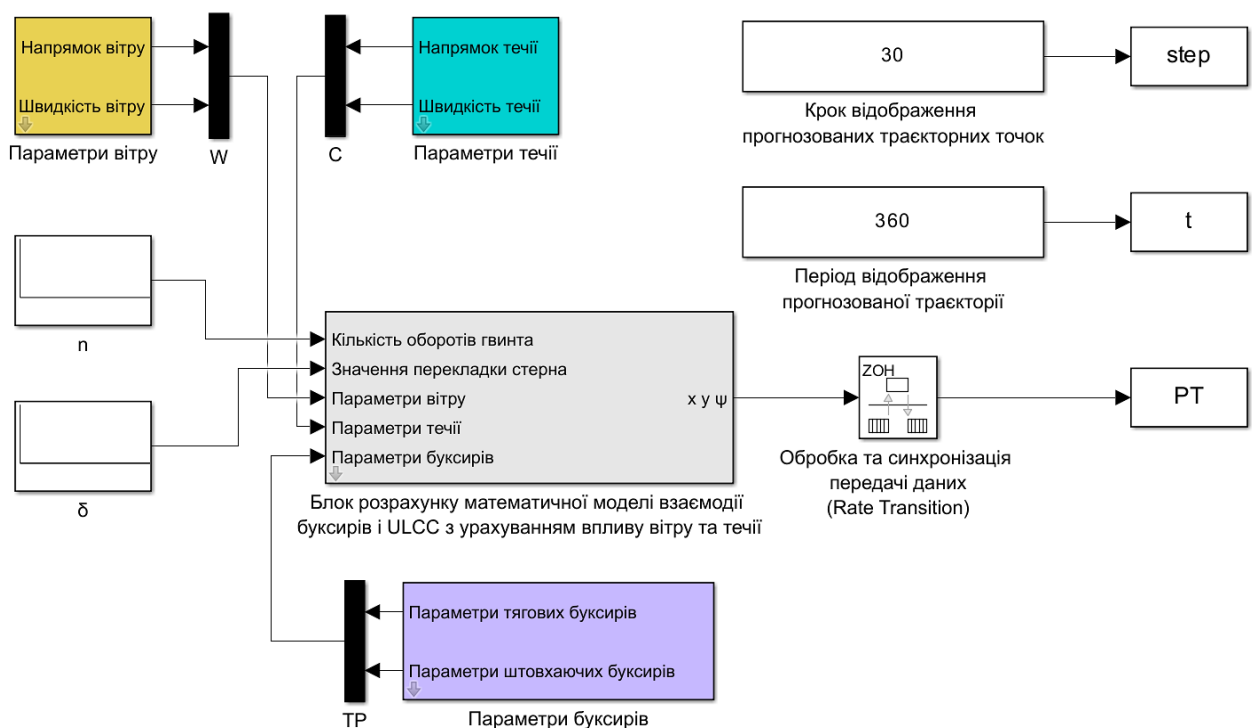


Рисунок 4.5 – Математична модель розрахунку прогнозованої траєкторії на основі математичної моделі взаємодії буксирів та ULCC в MATLAB Simulink R2024a

На рис. 4.6 наведені приклади розрахованих прогнозованих траєкторій як для судна, так і для буксиру на основі запропонованого розширеного алгоритму. Початкові умови відповідають сценарію, зображеному на рис. 4.2. Початкова позиція судна знаходиться в координатах (0,0), з курсовим кутом (ψ) 000° і кутом

стерна (δ) 0° . Для представлених сценаріїв напрямок вітру становить 45° , а швидкість вітру — 25 вузлів.

Рис. 4.6 (А) ілюструє прогнозовану траєкторію для судна, що працює в режимі Dead Slow Astern ($n = 19$ об/хв) зі швидкістю 2 вузли, що відповідає сценарію на рис. 4.3 (Б). Буксирний трос закріплено в носовій частині судна та в носовій частині буксира. Початкові координати буксира (140, 300), курсовий кут (ψ) 240° , кут повороту рушіїв 0° , швидкість 6 вузлів.

На рис. 4.6 (Б) зображено прогнозовану траєкторію судна в режимі Dead Slow Ahead ($n = 19$ об/хв) зі швидкістю 5.9 вузлів, що відповідає сценарію на рис. 4.3 (Г). Буксирний трос кріпиться до корми судна і носа буксира. Початкові координати буксира $(-250, -300)$, курсовий кут (ψ) 60° , кут повороту рушіїв 0° , швидкість 8 вузлів.

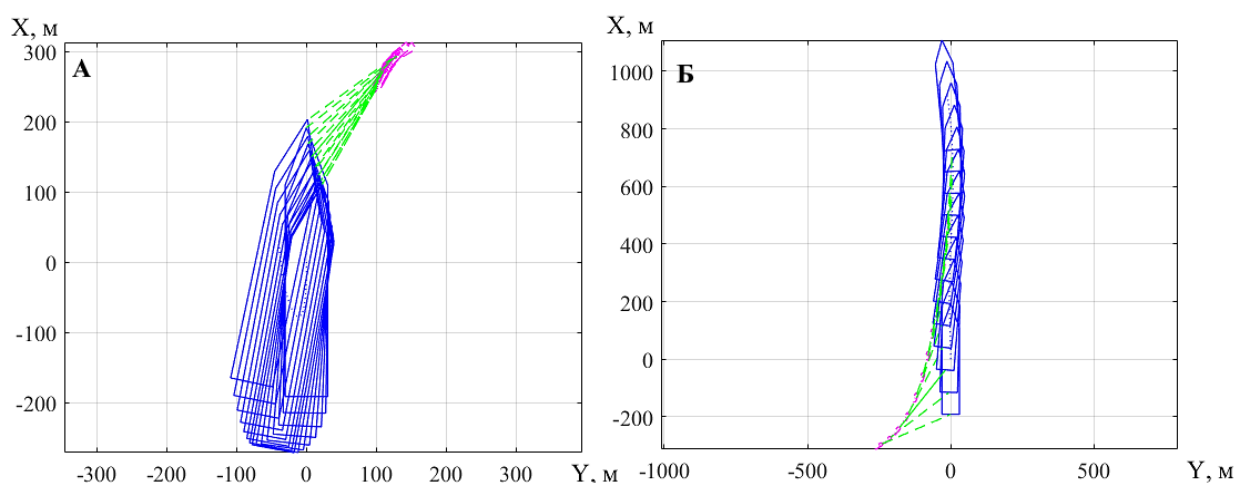


Рисунок 4.6 — Результати розрахунків прогнозованої траєкторії великотоннажного контейнеровозу з урахуванням вітрових навантажень та взаємодії з тяговим буксиром

Візуальне порівняння результатів змодельованих сценаріїв на рис. 4.3 з тими, що представлені на рис. 4.6, демонструє ефективність буксирів у маневруванні великотоннажним контейнеровозом на малих швидкостях під впливом вітрових навантажень.

Таким чином, за допомогою додаткових інформаційних даних, таких як прогнозована траєкторія з урахуванням буксирів, навігатори зможуть краще оцінювати ситуацію під час маневрів в акваторії порту. Проте, слід зазначити, що запропонована модель має певні обмеження.

По–перше, необхідною умовою є наявність адекватних математичних моделей як для великотоннажного контейнеровоза, так і для буксирів, які беруть участь у маневруванні. Оскільки судно може заходити в різні порти, а типи буксирів можуть відрізнятися, у звичних умовах отримати необхідні дані для виконання алгоритму є неможливим. Цю проблему можна вирішити за наявності готових баз даних для типових суден і відповідного програмного забезпечення в межах системи підтримки прийняття рішень.

Реалізація суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами передбачає розробку пристрою, призначеного для інформаційної підтримки процесу управління судном під час проведення спільних маневрів з буксирами. Це досягається завдяки інтеграції комплексної обробки як даних динамічного руху судна та буксирів, так і відповідних статичних параметрів судна та буксирів (таких як розміри, потужність рушійної установки тощо). Система має на меті забезпечити оператора (судноводія) інформацією в режимі реального часу щодо виконання спільних маневрів системою «судно–буксир», відповідними оцінками таких маневрів, автоматизованими рекомендаціями щодо безпеки маневрування та наданням доказових даних для вирішення морських інцидентів [150].

По–друге, алгоритм передбачає врахування певного переліку параметрів, які необхідно враховувати при маневруванні в портових акваторіях. Водночас в деяких портах можуть виникати додаткові умови, які впливають або можуть вплинути на поведінку судна та хід маневрування. Серед цих факторів – вплив мілководдя, близькість до берегової лінії, наявність поблизу інших суден, маневрування з віддачою якоря тощо.

По-третє, враховуючи попередні зауваження, в реальних умовах траєкторія судна може істотно відрізнятися від прогнозованої траєкторії на основі математичної моделі. Ця розбіжність пов'язана також з кількома факторами, які включають неточності в обліку впливу вітру та течії, різні умови завантаження судна, похибки в передачі змінних необхідних для розрахунку тощо.

Враховуючи вищезазначені обмеження алгоритму, доцільно адаптувати його для вирішення ряду виникаючих помилок і розширити його застосування. Через неоднорідність і невизначеність факторів і умов, які можуть явно чи неявно впливати на маневрування, доцільно розглянути адаптацію алгоритму прогнозування траєкторії на основі емпіричних (натурних) спостережень, яку можна реалізувати за допомогою нейронних мереж. Спираючись на алгоритм прогнозування траєкторії на основі математичної моделі, представленої у підрозділах 4.2 і 4.3, і спираючись на запропоновані нові рішення проблеми побудови прогнозованої траєкторії на основі нейронних мереж, розглянутих в підрозділі 4.1, нижче викладена спрощена схема алгоритму адаптивного прогнозування траєкторії судна на основі математичної моделі та нейронної мережі. Важливо підкреслити, що в контексті даної роботи представлений алгоритм обмежується теоретичним викладом.

На початковому етапі алгоритм адаптивного прогнозування траєкторії судна на основі натурних спостережень із використанням нейронної мережі передбачає збір необхідних даних, зокрема:

- статичних параметрів судна (тип, розміри, пропульсивна потужність);
- характерних для порту факторів (близькість до берегової лінії, засоби навігаційного обладнання, наявність інших суден);
- факторів навколишнього середовища (вітер, течія, глибина води).
- математичної основи для побудови прогнозованої траєкторії на базі математичної моделі, включаючи динамічні дані (швидкість, курс, положення);

Другий крок передбачає попередню обробку даних, яка включає:

- фільтрація та нормалізація для забезпечення узгодженості;

- поділ на набори для навчання, перевірки та тестування;
- розробка функцій для вилучення релевантних параметрів із необроблених даних.

Наступним кроком є налаштування моделі нейронної мережі, яка включає:

- вибір архітектури нейронної мережі;
- визначення вхідного рівня для прийняття попередньо оброблених параметрів;
- додавання прихованих рівнів із відповідними функціями активації;
- визначення вихідного рівня для прогнозування траєкторії судна.

Після конфігурації нейронної мережі етап навчання моделі включає:

- ініціалізацію нейронної мережі випадковими вагами;
- використання навчальних даних для тренування моделі з використанням відповідної функції втрат (наприклад, середньої квадратичної помилки) та певного алгоритму оптимізації.

- регулярну перевірку моделі для моніторингу продуктивності та запобігання «перенавчанню» (overfitting).

Після завершення навчання моделі її необхідно перевірити на тестовому наборі даних для оцінки її точності та здатності до узагальнення, за використанням таких показників продуктивності, як середньоквадратична помилка, середня абсолютна помилка і R-квадрат (коефіцієнт детермінації).

Наступний етап передбачає адаптацію моделі, яка включає впровадження механізму онлайн-навчання для адаптації моделі в режимі реального часу на основі нових даних, а також безперервне оновлення параметрів моделі з використанням останніх даних траєкторії та навколишніх спостережень.

Останні кроки включають інтеграцію моделі та постійний моніторинг ефективності та точності системи. Під час інтеграції навченої та адаптивної моделі нейронної мережі в судову систему підтримки прийняття рішень важливо переконатися, що система забезпечує точні прогнози траєкторії в режимі реального часу.

4.4 Висновки до четвертого розділу

В даному розділі було розглянуто питання прогнозування траєкторії руху судна. На основі проведеного аналізу сучасних методів вирішення цієї проблеми було запропоновано вдосконалити існуючі рішення шляхом побудови алгоритму прогнозування траєкторії, заснованого на математичній моделі судна, зокрема великотоннажного контейнеровоза.

В цьому контексті, також було отримано розширений алгоритм з метою врахування взаємодії судна з буксирами, при чому результуючі сили від буксирування також базуються на викладеній математичній моделі у розділі 3.

Слід підкреслити, що в цьому контексті вирішення завдання прогнозування траєкторії може привести до підвищення безпеки судноплавства в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування надвеликих суден у портових акваторіях, що може бути досягнуто наступними способами:

1) реалізація в навчальних навігаційних тренажерах: шляхом включення алгоритму в навчальні навігаційні симулятори судноводії можуть отримати досвід маневрування великотоннажними контейнеровозами в різних сценаріях. Таке практичне навчання на тренажерах може зменшити ризик помилок під час виконання реальних рейсів;

2) моделювання сценаріїв маневрування з буксирами: для випадків коли судно не може підтримувати курс без допомоги буксирів можливо визначити ефективні стратегії буксирування для утримання великотоннажного контейнеровозу на курсі;

3) реалізація в судових системах підтримки прийняття рішень.

У розділі також наголошується, що в реальних умовах реалізація запропонованого алгоритму суттєво обмежена великою кількістю невизначених змінних, таких як вплив мілководдя, близькість до берегової лінії, наявність інших суден поблизу, неточності в обліку впливу вітру та течії, різні умови завантаження судна та помилки в передачі змінних, необхідних для розрахунків тощо. З метою вирішення цих обмежень запропоновано загальне теоретичне

представлення адаптивного алгоритму прогнозування траєкторії судна на основі математичної моделі та нейронної мережі. Практична розробка та тестування такого алгоритму є предметом майбутніх досліджень.

Зміст даного розділу викладено в роботах [46], [48], [93], [150].

РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ МАНЕВРУВАННЯ З ПРОГНОЗУВАННЯМ ТРАЄКТОРІЇ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ СУДНА І БУКСИРА

5.1 Моделювання маневрування великотоннажного контейнеровоза у режимі реального часу

Важливо підкреслити, що з точки зору імітаційного моделювання миттєве моделювання, таке як те, що проводиться в середовищі MATLAB R2024a, більше підходить для отримання даних про стан і характеристики об'єктів у прискореному часі, насамперед у числовій або графічній формі для їх подальшого аналізу. До суттєвих обмежень цього виду моделювання можна віднести, з одного боку, неможливість проведення моделювання в режимі реального часу з повною візуалізацією об'єктів, а з іншого – неточність визначення точок прикладання сили. Наприклад, у тягових буксирів місця кріплення буксирного каната можуть відрізнятися від конструктивно визначених, що призводить до помилок у розрахунку довжини каната. Це, у свою чергу, призводить до зниження точності обчислення результуючих сил і, як наслідок, прогнозованої траєкторії. І навпаки, для штовхаючого буксира точні розрахунки вимагають визначення моменту зіткнення з судном, точки прикладання сили, кінематичних зв'язків і сил взаємодії.

З метою вирішення зазначених проблем було обране середовище розробки Unity 2022.3.8f1 для симуляції маневрування в режимі реального часу з використанням відповідних моделей суден. Можливість симуляції в режимі реального часу є важливою для тестування та вдосконалення алгоритмів маневрування в різних умовах.

Unity містить широкий спектр стандартних бібліотек, які полегшують реалізацію складної фізичної поведінки, забезпечують коректну фізичну взаємодію об'єктів, включаючи їх реакцію на зіткнення, гравітацію та прискорення.

Для візуалізації великотоннажного контейнеровоза була використана тривимірна модель відповідного розміру та конфігурації. З точки зору програмування виділимо основні компоненти, а саме: налаштування коллайдерів по обводам корпусу судна, програмна реалізація руху судна у реальному часі, а також асинхронна реалізація розрахунку прогнозованої траєкторії для заданого проміжку часу. Сконфігурована модель великотоннажного контейнеровоза була інтегрована в програмне забезпечення NavSimulator компанії Learnmarine, яке включає верифіковану модель буксира з азимутальними рушійми, враховуючи остійність згідно з дослідженнями [89], [98], [156]. Характеристики контейнеровоза та буксира наведені у додатках А та Б відповідно. На рис. 5.1 відображена сцена з налаштованого середовища для моделювання сценаріїв маневрування.



Рисунок 5.1 – Сцена навігаційного симулятора в Unity 2022.3.8f1

В межах даного дослідження, налаштоване симуляційне середовище відповідає наступним властивостям:

- 1) дозволяє проводити симуляції маневрування у відкритому водному просторі;
- 2) має функціонал для встановлення базових портових об'єктів, таких як причали, навігаційні буї, берегові лінії;
- 3) дозволяє налаштовувати умови зовнішніх сил, таких як вітер та течія згідно з алгоритмом, описаним у розділі 4 алгоритму (рис. 4.4 та рис. 4.5);
- 4) враховує фізичні взаємодії об'єктів, а саме зіткнень (колізій);
- 5) враховує остійність буксирів.

Таким чином, використовуючи мову програмування C# та концепції об'єктно-орієнтованого програмування було налаштоване середовище для симулювання маневрування великотоннажного контейнеровозу в умовах портових вод та з можливістю залучення до процесу маневрування буксирів, з урахуванням обмежень їх маневреності.

На початковому етапі в сконфігурованому середовищі моделювання було проведено серію стандартних маневрів для перевірки параметрів маневреності моделі великого контейнеровоза в режимі реального часу за результатами випробувань судна «MSC Nela» [64]. Основні характеристики судна наведені в додатку А. Проведені стандартні маневри включають:

- для параметрів хідкості: розгін, інерційне та активне гальмування;
- для параметрів повороткості та утримування на курсі: «зигзаг 10/10» та циркуляція на правий борт.

Для оцінки точності взято наступні параметри, а саме:

- 1) для маневрів розгону та гальмування – швидкість та пройдена дистанція;
- 2) для маневру циркуляції – висув, тактичний діаметр циркуляції;
- 3) для маневру «зигзаг 10/10» – значення першого та другого кутів зарискування.

Результати верифікації в режимі реального часу моделі великотоннажного контейнеровозу за даними випробувань представлені на рис. 5.3–5.7, а також у табл. 5.1 та табл. 5.2.



Рисунок 5.2 – Вид зверху: маневр «зигзаг 10/10»

Рис. 5.2 ілюструє приклад моделювання маневру «зигзаг 10/10» в середовищі розробки. В верхній частині показані поточні параметри моделі. Внизу також відображено панель керування контейнеровозом в рамках моделювання. Корпуси судна жовтого кольору та крива синього кольору позначають пройдену траєкторію.

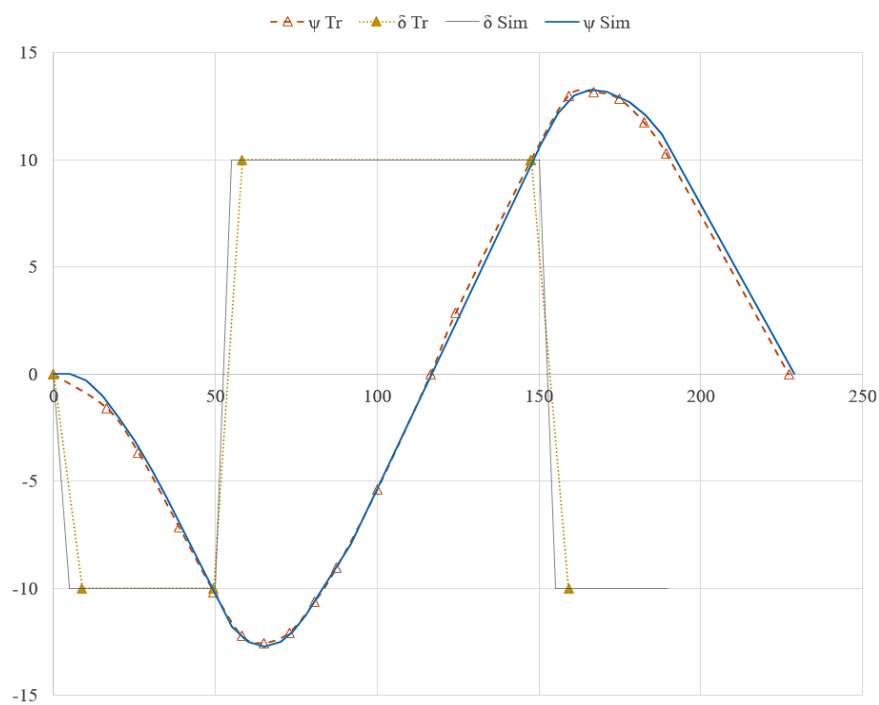


Рисунок 5.3 – Параметри утримання на курсі: моделювання маневру «зигзаг 10/10» та порівняння з даними випробувань

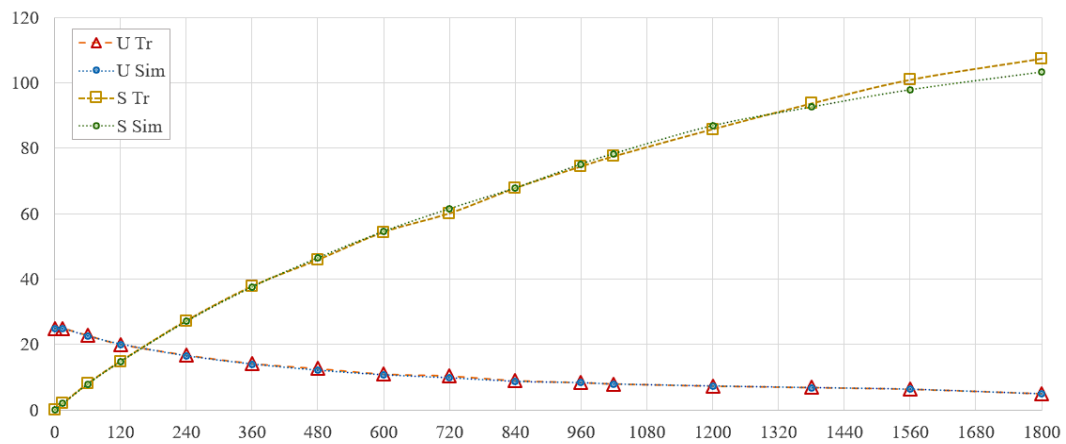


Рисунок 5.4 – Параметри хідкості: моделювання інерційного гальмування та порівняння з даними випробувань

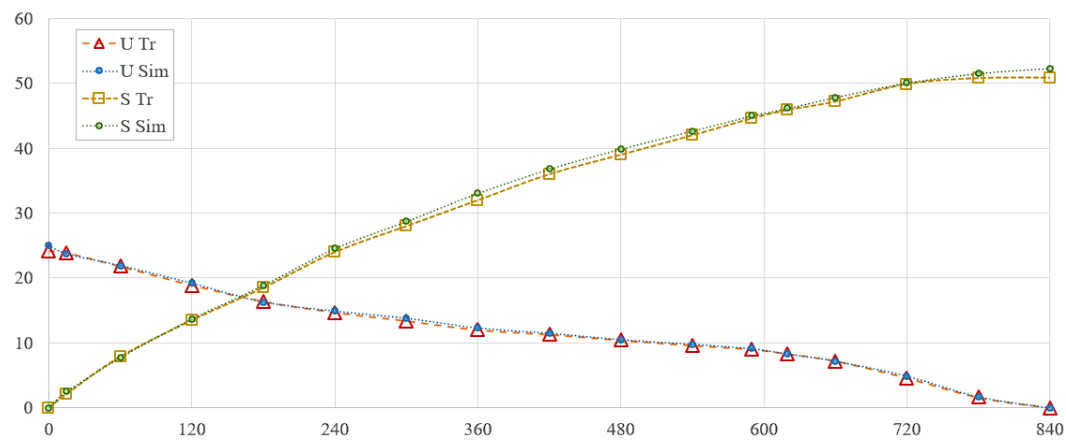


Рисунок 5.5 – Параметри хідкості: моделювання активного гальмування та порівняння з даними випробувань

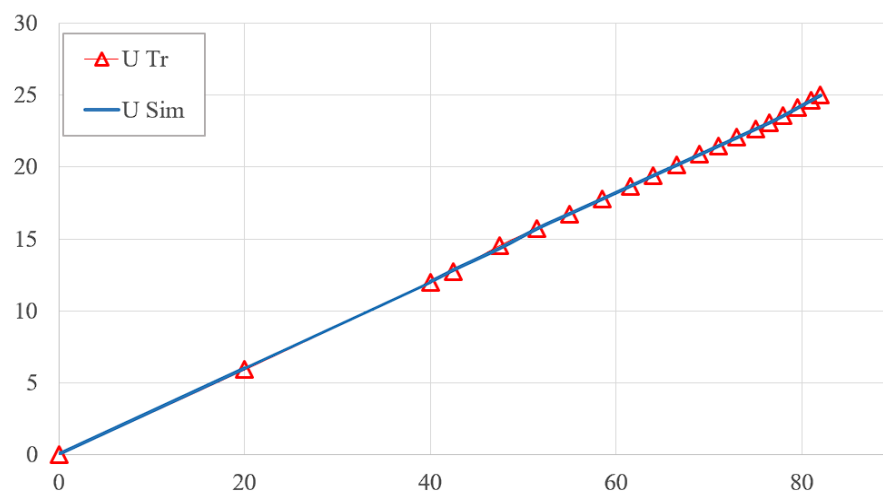


Рисунок 5.6 – Параметри хідкості: моделювання розгону та порівняння з даними випробувань

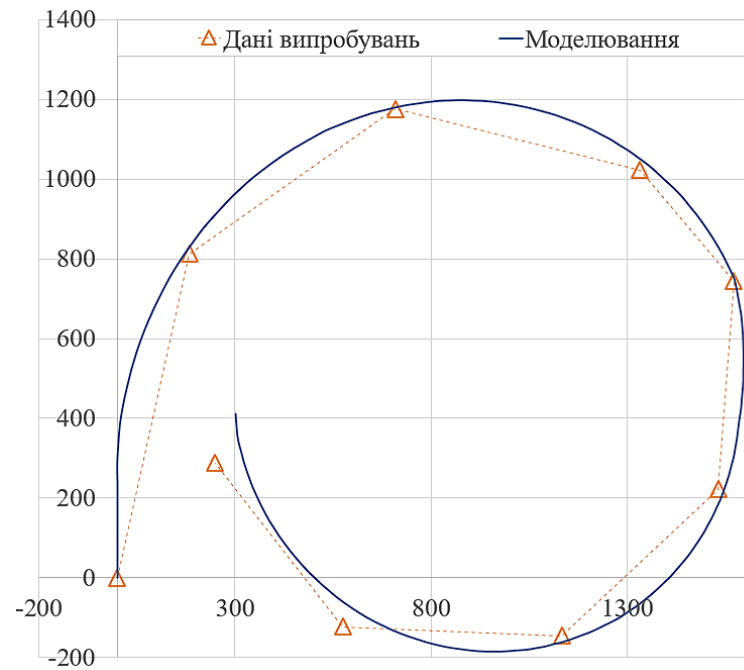


Рисунок 5.7 – Параметри повороткості: моделювання циркуляції на правий борт 35° та порівняння з даними випробувань

На рис. 5.3–5.7 графічно зіставлені результати моделювання та випробувань. В табл. 5.1 та табл. 5.2 зведені значення критеріїв оцінки та відповідні відхилення, які є достатньо точними та задовільними в контексті даного дослідження. Позначення на рисунках Tr відповідає даним випробувань, а Sim результатам симуляцій.

Таблиця 5.1 – Результати верифікації хідкості моделі за результатами випробувань

Параметр	Умовне позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Розгін: Середнє відхилення швидкості	ΔU	вуз	0,04
Активне / інерційне гальмування: Середнє відхилення швидкості	ΔU_{Cs} ΔU_D	вуз	0,19 0,18

Продовження таблиці 5.1

Активне / інерційне гальмування: Відносна похибка розрахунку дистанції	ΔS_{CS}	% / м	0,057 / 2,9
	ΔS_D		0,036 / 3,9

Таблиця 5.2 – Результати верифікації поворотності та утримання на курсі моделі за результатами випробувань

Параметр	Моделювання	Випробування
Висув, м	1179,0	1176,1
Тактичний діаметр циркуляції, м	1570,8	1572,2
Кут зарискування перший, °	2,7	2,5
Кут зарискування другий, °	3,3	3,2
СКВ позиції судна, м	27,5	—
СКВ курсу судна, °	8,2°	—

На рис. 5.8 представлено вид зверху маневру циркуляції на правий борт моделі великотоннажного контейнеровоза в середовищі розробки з початковою швидкістю 25 вузлів та обертаннями гвинта 80 об/хв з метою перевірки та демонстрації роботи алгоритму прогнозування траєкторії руху судна. Моделювання відбувається в умовах вітру 70°, швидкістю 19 вузлів. На рис. 5.8 фактичний пройдений шлях зображено жовтим кольором, тоді як прогнозована траєкторія показана сірим. Для наочності поточне положення судна виділено зеленим кольором. Під час моделювання маневру циркуляції великотоннажного контейнеровоза координати прогнозованої та фактичної траєкторій були записані та зведені на рис. 5.9 для візуального порівняння результатів.

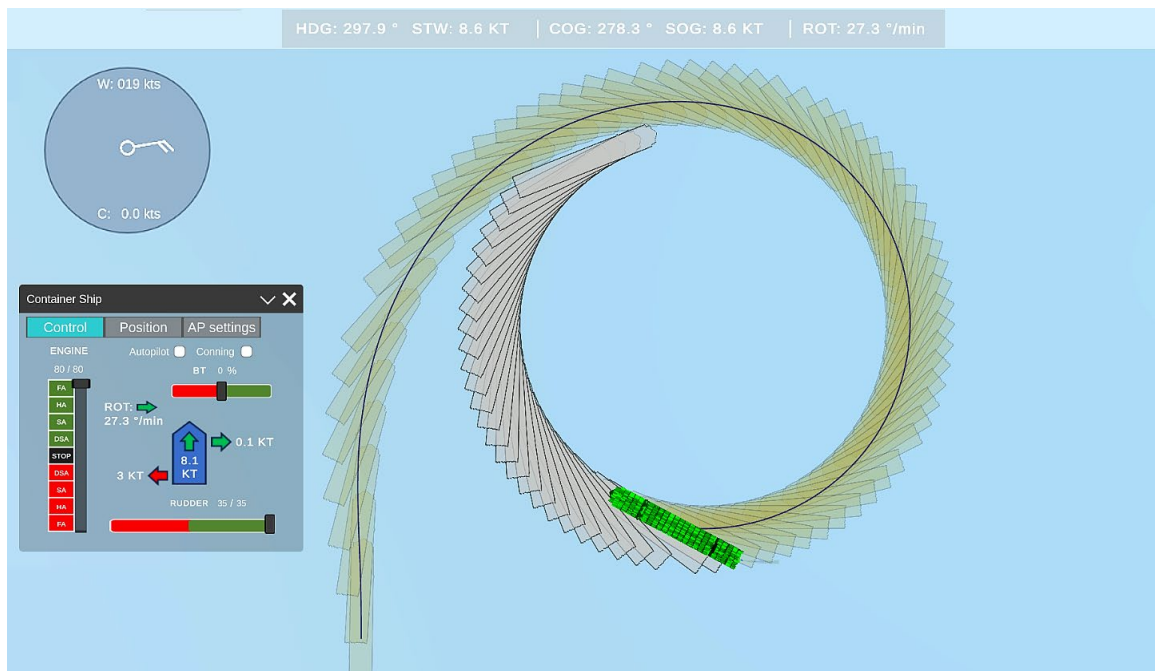


Рисунок 5.8 – Вид зверху: маневр циркуляції судна з прогнозуванням траєкторії в умовах вітру 70°, швидкістю 19 вузлів

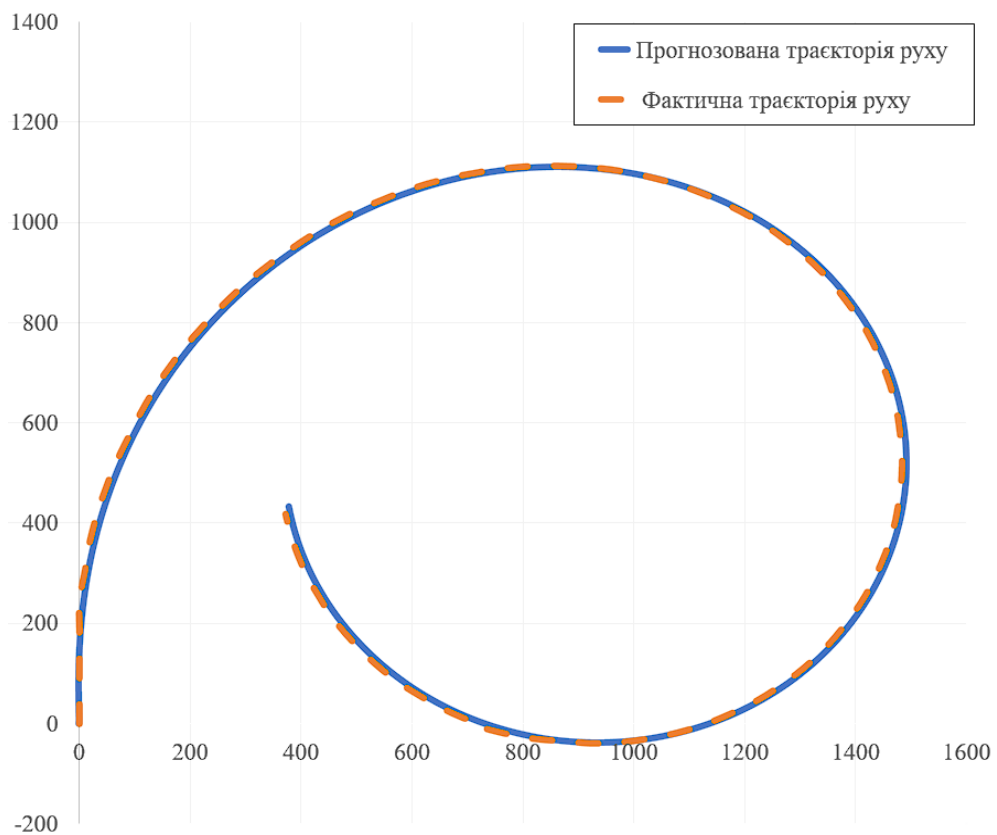


Рисунок 5.9 – Прогнозована та фактично пройдена траєкторія маневру циркуляції судна в умовах вітру 70°, швидкістю 19 вузлів

З рис. 5.9 видно, що візуальне відхилення прогнозованої траєкторії є незначним. Відхилення можна пояснити тим фактом, що розрахунок фактичного руху судна відбувається в режимі реального часу, коли середовище розробки обробляє фізичні залежності, тоді як обчислення прогнозованої траєкторії викликається асинхронно через задані проміжки часу. Значення середньої квадратичного відхилення при цьому не перевищує 3,2 м. Для прикладу, відповідно до Резолюцій Міжнародної морської організації А.915(22) та А.1046(27) системи позиціонування суден повинні надавати інформацію про місцезнаходження з похибкою не більше 10 м з імовірністю 95 % при навігації в межах підходів до портів і обмежених водах [33], [34], [144].

5.2 Моделювання маневрування великотоннажного контейнеровоза з буксирами в режимі реального часу з прогнозуванням траєкторії

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму прогнозування траєкторії в реальному часі для судна та взаємодії судно-буксир на основі математичної моделі було змодельовано три сценарії маневрування, а саме два сценарія гальмування, а також маневрування при виході з акваторії порту:

- 1) Інерційне гальмування великотоннажного контейнерного судна.
- 2) Інерційне гальмування великотоннажного контейнерного судна із залученням кормового буксира.
- 3) Відхід від причалу та вихід з портової акваторії великотоннажного контейнерного судна з використанням двох буксирів.

Для першого сценарію критеріями оцінки роботи алгоритму доцільно прийняти середнє відхилення прогнозованого положення та швидкості судна. Порівняння прогнозованих значень через заданий проміжок часу з фактичними значеннями у відповідний поточний час дозволить оцінити точність алгоритму для сценарію інерційного гальмування в контексті даного дослідження.

Рис. 5.10 ілюструє початкові умови першого змодельованого сценарію,

зокрема інерційне гальмування великотоннажного контейнеровоза з початкової швидкості 8 вузлів із прогнозуванням траєкторії.

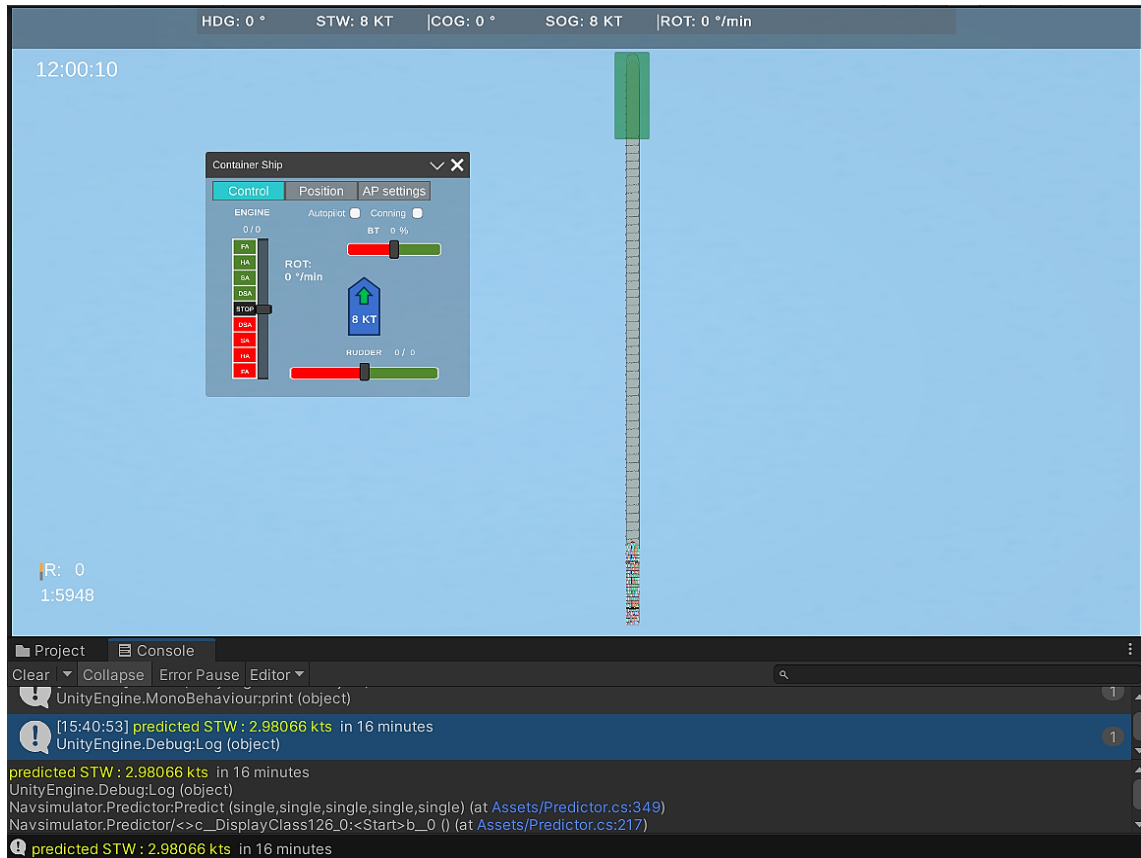


Рисунок 5.10 – Вид зверху: початок моделювання інерційного гальмування великотоннажного контейнеровоза з початкової швидкості 8 вузлів

У цьому випадку передбачену траєкторію відображено для наступних 16 хвилин часу моделювання з кроком 10 секунд. На рис. 5.10, прогнозована позиція після 16 хвилин симуляції виділена зеленим прямокутником для зручності демонстрації та порівняння з фактичною позицією через заданий проміжок часу. Поточний час симуляції відображений у верхньому лівому куті та становить 12:00:10. Консоль у нижній частині рисунка показує розраховану прогнозовану швидкість для виділеної позиції і становить 2,98 вузла. В верхній частині рисунка відображені поточні параметри судна.

На рис. 5.10 та рис. 5.11 прогнозована траєкторія зображена у вигляді двовимірних корпусів судна сірим кольором, тоді як фактично пройдена жовтим.

На рис. 5.11 зображено поточне положення та параметри судна через 16 хвилин моделювання з моменту початку маневру інерційного гальмування великотоннажного контейнеровоза з початкової швидкості 8 вузлів. Показано, що судно знаходиться з незначним відхиленням в межах зеленого прямокутника, який позначає прогнозоване положення судна, а поточна швидкість становить 3 вузли, що відповідає попередньому прогнозованому значенню. Оцінка точності результатів моделювання зведена до табл. 5.3.

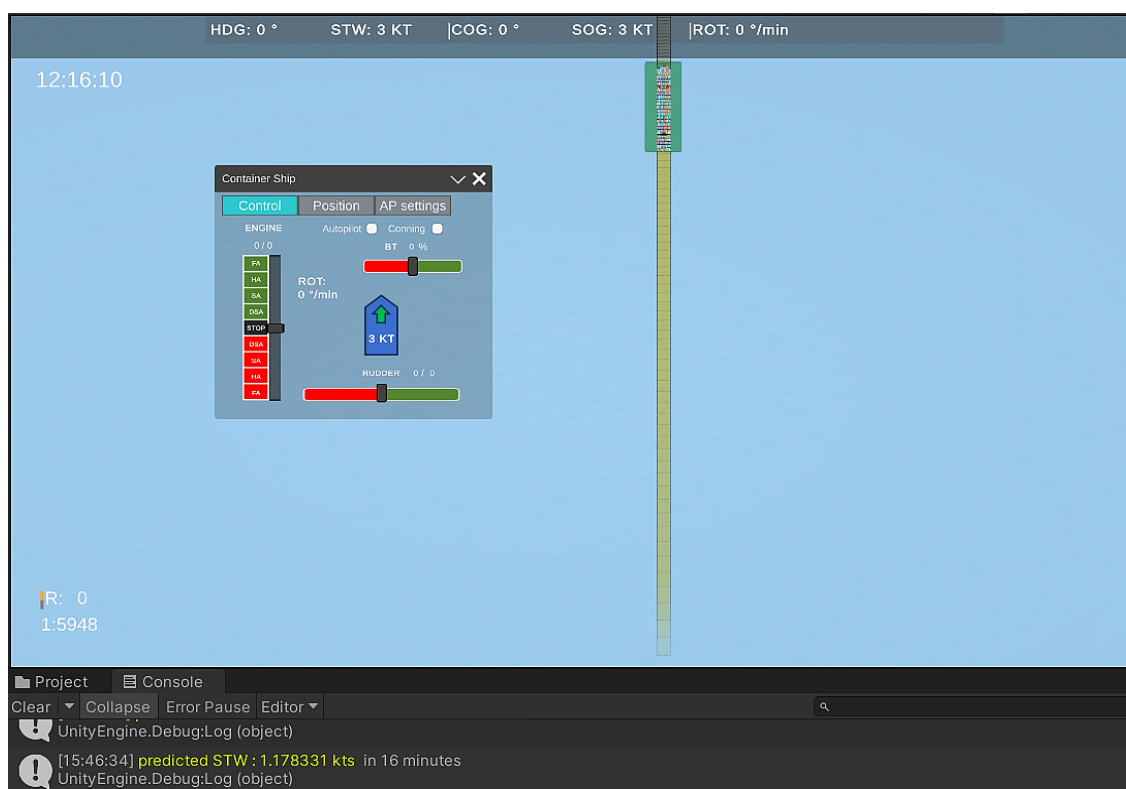


Рисунок 5.11 – Вид зверху: моделювання інерційного гальмування з початкової швидкості 8 вузлів: положення через 16 хв симуляційного часу

Моделювання другого сценарію гальмування великотоннажного контейнеровоза у реальному часі з прогнозуванням траєкторії передбачає використання буксира (рис. 5.12). Тому критерії оцінки повинні включати не тільки прогнозовану швидкість і положення судна, але й реєстрацію поточного натягу на буксирному тросі та відповідних кутів крену буксира в режимі непрямого буксирування (indirect towing). Цей підхід спрямований на усунення

помилки у фізичній взаємодії, таких як нереалістичні значення та/або поведінка моделей суден під час взаємодії.

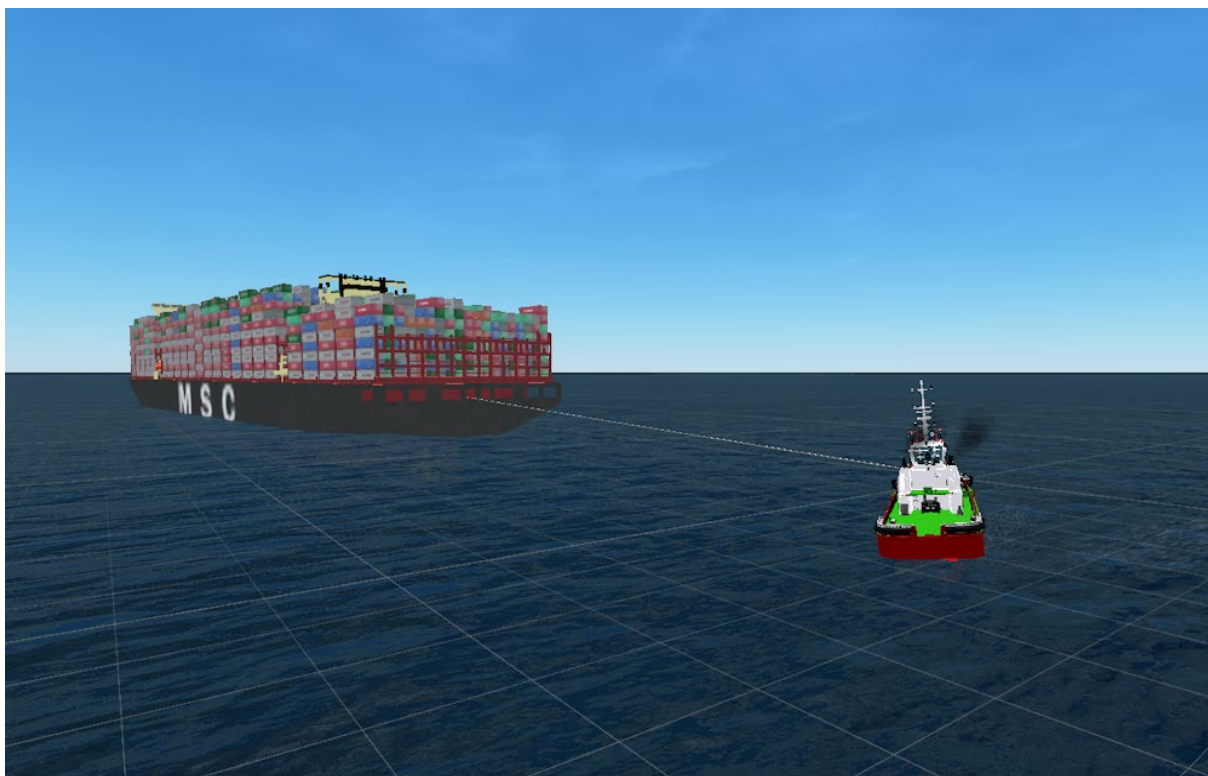


Рисунок 5.12 – Моделювання гальмування великотоннажного контейнеровоза з початкової швидкості 8 вуз за допомогою кормового буксира в режимі непрямого буксирування

Рис. 5.13 ілюструє початкові умови другого змодельованого сценарію, гальмування великотоннажного контейнеровоза за допомогою кормового буксира, з початкової швидкістю 8 вузлів із прогнозуванням траєкторії. Для даного сценарію передбачену траєкторію відображено для наступних 10 хвилин часу моделювання з кроком 10 секунд. На даному рисунку буксир ще не вийшов на задану довжину буксирної лінії (80 м), тому прогнозована траєкторія розраховується без урахування сил буксиру. На двовимірному зображенні відсутнє зображення буксирної лінії.

Рис. 5.14 ілюструє умови другого змодельованого сценарію, коли буксир вже вийшов на задану довжину буксирної лінії 80 м.

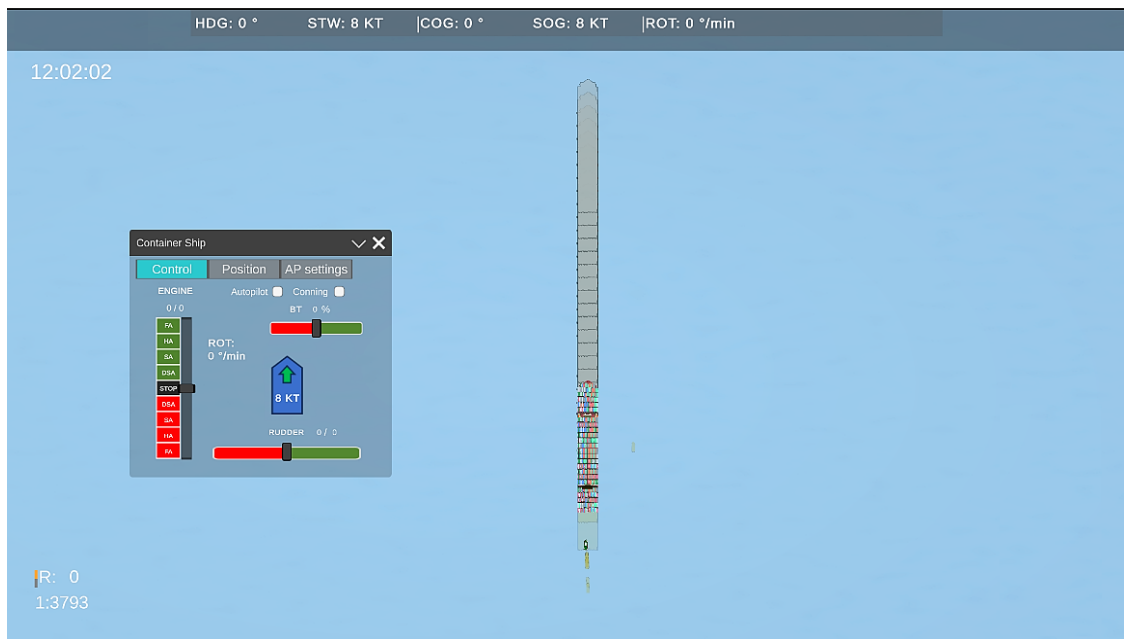


Рисунок 5.13 – Вид зверху: початок моделювання гальмування судна за допомогою кормового буксира з прогнозуванням траєкторії

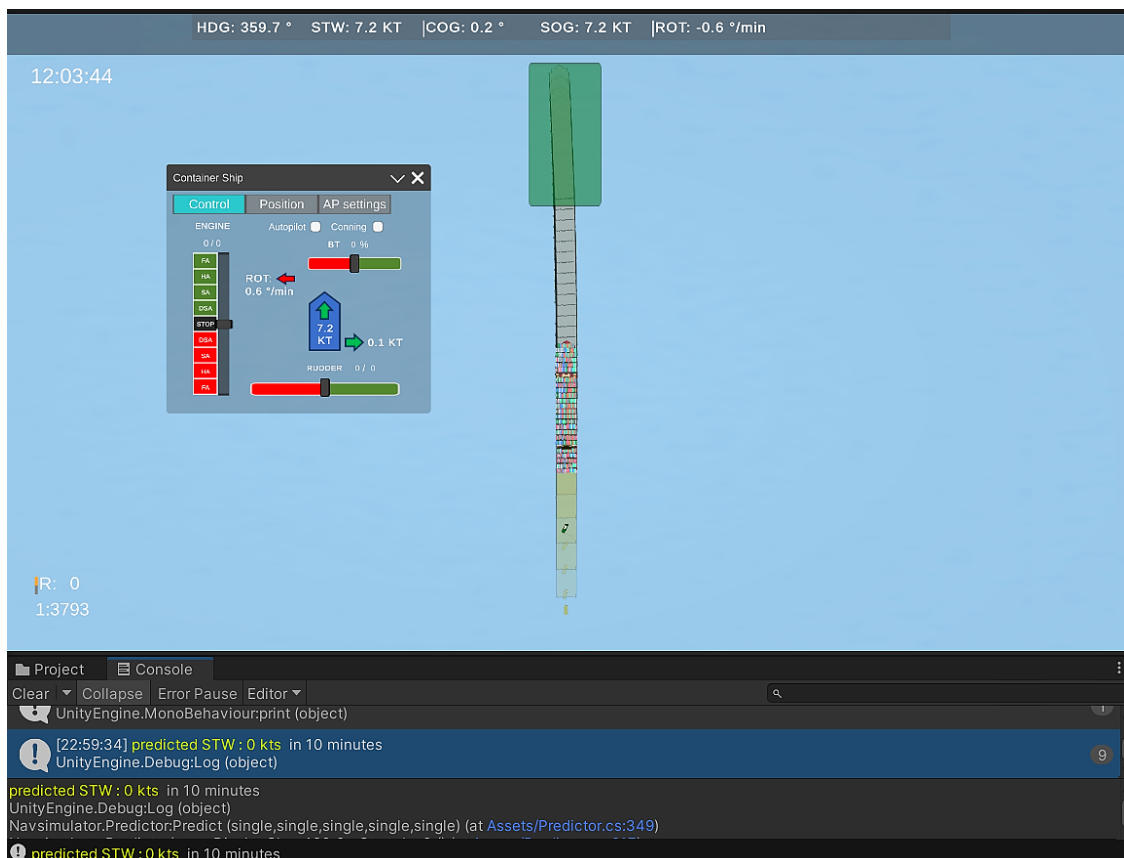


Рисунок 5.14 – Вид зверху: моделювання гальмування великотоннажного контейнеровоза за допомогою кормового буксира в режимі непрямого буксирування з прогнозуванням траєкторії

Прогнозована позиція зупинки судна виділена зеленим прямокутником для зручності демонстрації та порівняння з фактичною позицією через заданий проміжок часу 10 хвилин. Поточний час симуляції відображений у верхньому лівому куті та становить 12:03:44. Консоль у нижній частині рисунка показує розраховану швидкість для виділеної прогнозованої позиції зупинки судна. В верхній частині рисунка відображені поточні параметри судна. Панель керування судном відображається в лівій частині.

Слід зазначити, що в даному випадку моделювання відбувається в умовах реального управління буксиром, в процесі якого контролюється не тільки значення натягу тросу, але і збереження остійності буксира, тобто результуючі сили буксирування змінюються в залежності від маневрування. З цієї причини прогнозування на великий проміжок часу надає приблизні дані щодо положення судна, в той час як оновлені дані щодо прогнозованої траєкторії (рис. 5.15–5.16) надають інформацію з урахуванням нових вхідних значень та уточнені значення впродовж виконання маневру.



Рисунок 5.15 – Вид зверху: етап корекції кутової швидкості судна в процесі гальмування за допомогою непрямого буксирування

На рис. 5.15 показано, що швидкість судна становить 0,5 вузла, і воно вже перетинає межу прогнозованого положення, позначену зеленим прямокутником. Кутова швидкість від буксирування при цьому становить – 2,5 градуси за хвилину.

Рисунок 5.16 ілюструє фінальний етап маневру гальмування великотоннажного контейнеровоза за допомогою кормового буксира, коли буксир вже віддав буксирний трос, і судно не має поздовжньої швидкості. Кутова швидкість судна становить 1,5 градуси за хвилину і поступово зменшується.



Рисунок 5.16 – Вид зверху: фінальний етап моделювання гальмування великотоннажного контейнеровоза за допомогою кормового буксира в режимі непрямого буксирування з прогнозуванням траєкторії

Аналізуючи фактичне положення судна і поточний час симуляції, можна відзначити достатню точність щодо прогнозованого положення в даному сценарії. Однак, як зазначалося раніше, в цьому випадку відхилення позицій можуть бути обґрунтовані змінним натягом буксирного троса в процесі маневрування буксира, оскільки для попереднього прогнозування було використано лише одне поточне значення на момент розрахунку. Оцінка точності результатів моделювання зведена до табл. 5.3.

Під час моделювання гальмування великотоннажного контейнеровоза з кормовим буксиром також були зареєстровані кути крену буксира та відповідний натяг на буксирному канаті через кожні 2 секунди симуляції. Записані дані зведені до рис. 5.17. Кути крену (Heel angle) відображені синім кольором, а натяг троса (Rope Tension) помаранчевим. З рисунка видно, що кути крену не перевищують 6° , а натяг буксирного тросу не перевищує 90 тон. Наведені значення є допустимими з точки зору остійності та тягових характеристик буксира.



Рисунок 5.17 – Графік значень кутів крену ($^\circ$) буксира при певному значенні натягу на буксирному тросі (т/10) впродовж моделювання

В контексті другого сценарію також було проведено аналогічне моделювання гальмування судна з початкової швидкості 8 вузлів за допомогою буксира з метою оцінки динамічного прогнозу швидкості. З цією метою консоль була налаштована на виведення прогнозованої швидкості судна для кожних наступних 5 хвилин часу моделювання через інтервали 10 секунд. Початкові

умови ідентичні попередньому моделюванню. На рисунках 5.18–5.21 зображені приклади виводу повідомлень в процесі виконання маневрування.

Рисунок 5.18 ілюструє процес гальмування судна за допомогою кормового буксира коли буксир вже вийшов на довжину буксирної лінії 80 м. Згідно з повідомленнями консолі, швидкість судна становитиме 2,7 вузла через 5 хвилин від поточного часу симуляції, який показаний у верхньому лівому куті.

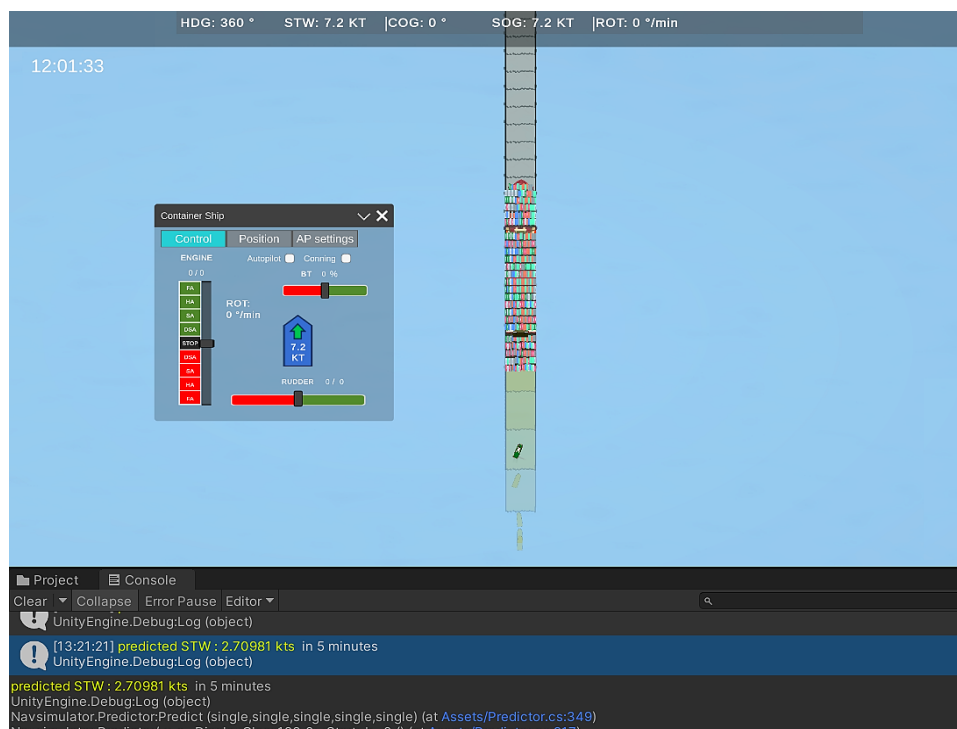


Рисунок 5.18 – Вид зверху: моделювання гальмування судна за допомогою кормового буксира з прогнозуванням траєкторії – прогнозування швидкості

На рис. 5.19 показано поточні характеристики та положення судна через п'ять хвилин після початку прогнозування, як показано на рис. 5.18. З рисунка видно швидкість судна на цьому етапі, яка становить 2,7 вузли, що відповідає попередньому прогнозованому значенню. Подібно до попереднього етапу, в консолі відображено прогнозовану швидкість через наступні п'ять хвилин часу моделювання, яке становить 0,9 вузла.

Наступний етап показано на рис. 5.20. Значення поточної швидкості судна відповідає попередньому прогнозованому значенню. На рис. 5.20 також показано прогнозоване положення зупинки контейнеровоза.

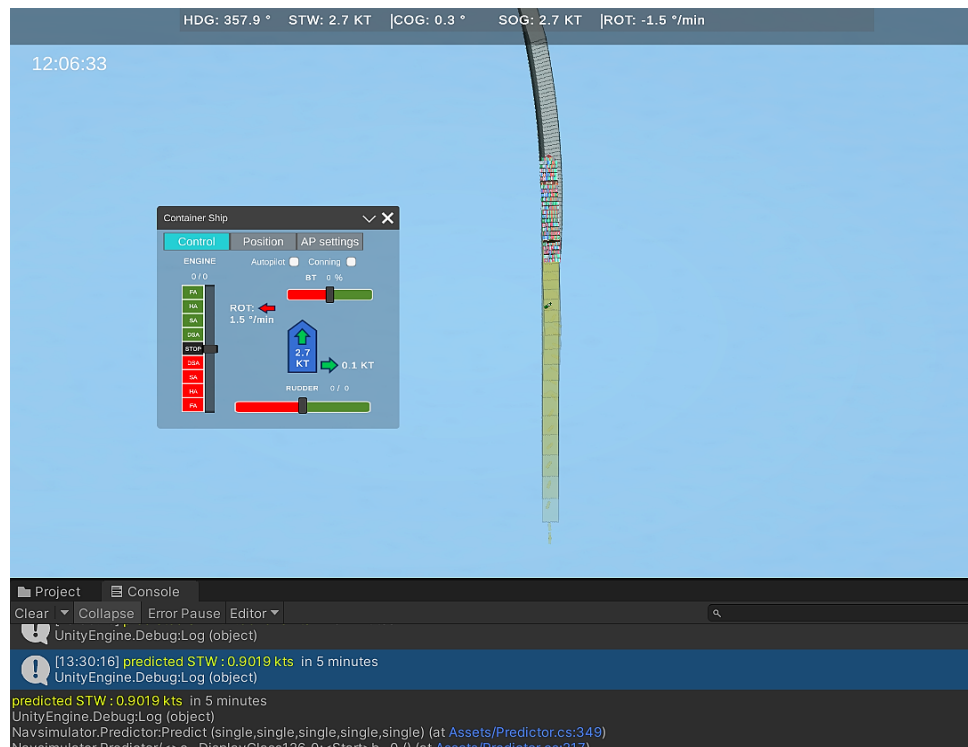


Рисунок 5.19 – Вид зверху: моделювання гальмування судна за допомогою кормового буксира – порівняння та прогнозування швидкості

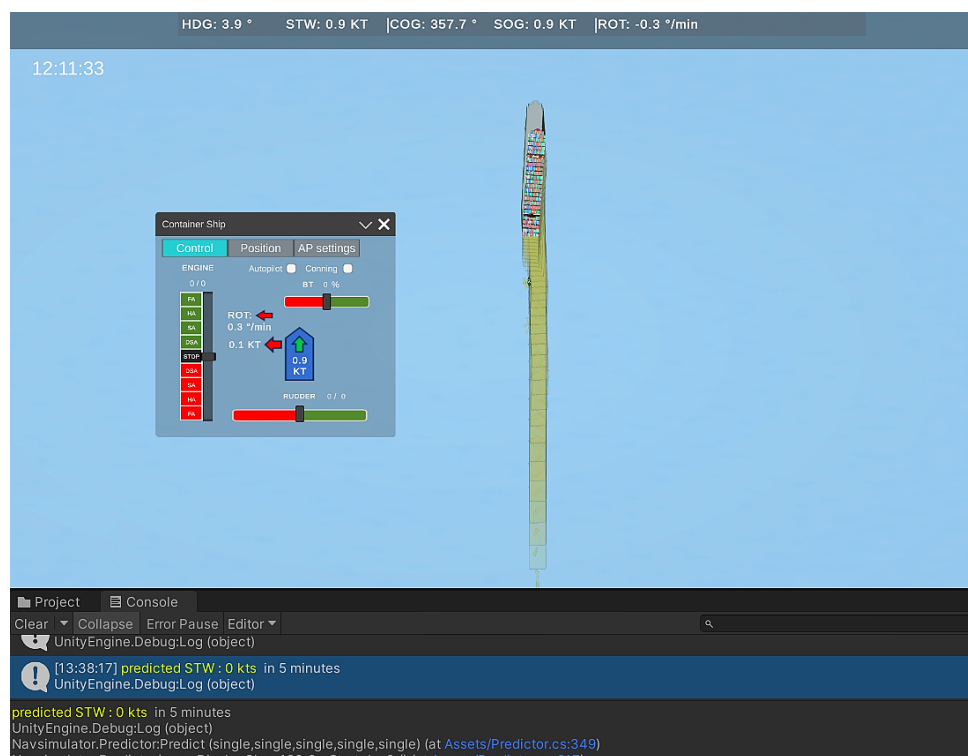


Рисунок 5.20 – Вид зверху: моделювання гальмування судна за допомогою кормового буксира – порівняння швидкості та прогнозування місця зупинки судна

Рис. 5.21 ілюструє фінальний етап даного моделювання гальмування великотоннажного контейнеровоза за допомогою кормового буксира. На рис. видно, що швидкість судна дорівнює нулю. Фактичне положення зупинки відповідає прогнозованому з мінімальним відхиленням курсу та координат. Оцінка точності результатів моделювання наведена в табл. 5.3.



Рисунок 5.21 – Вид зверху: моделювання гальмування судна за допомогою кормового буксира з прогнозуванням траєкторії – судно зупинено

З точки зору підвищення безпеки маневрування великотоннажного контейнеровоза в акваторії порту, включаючи постановку до причалу та відхід від нього, доцільно розглянути третій сценарій, а саме процес маневрування судна під час відходу від причалу в умовах обмеженого простору в носовій та кормовій частині через наявність інших суден (рис. 5.22).

За умовами істинний вітер має напрямок 51° , а його швидкість становить 13,4 вузли. Початковий курс судна 90° . На першому етапі носовий та кормовий буксири з азимутальними рушіями відтягують судно від причалу, при цьому великотоннажний контейнеровоз не використовує власну силову установку або

носовий підрулюючий пристрій. Процес поетапного маневрування показано на рис. 5.22–5.26.



Рисунок 5.22 – Моделювання відходу великотоннажного контейнеровоза від причалу за допомогою буксирів в режимі реального часу

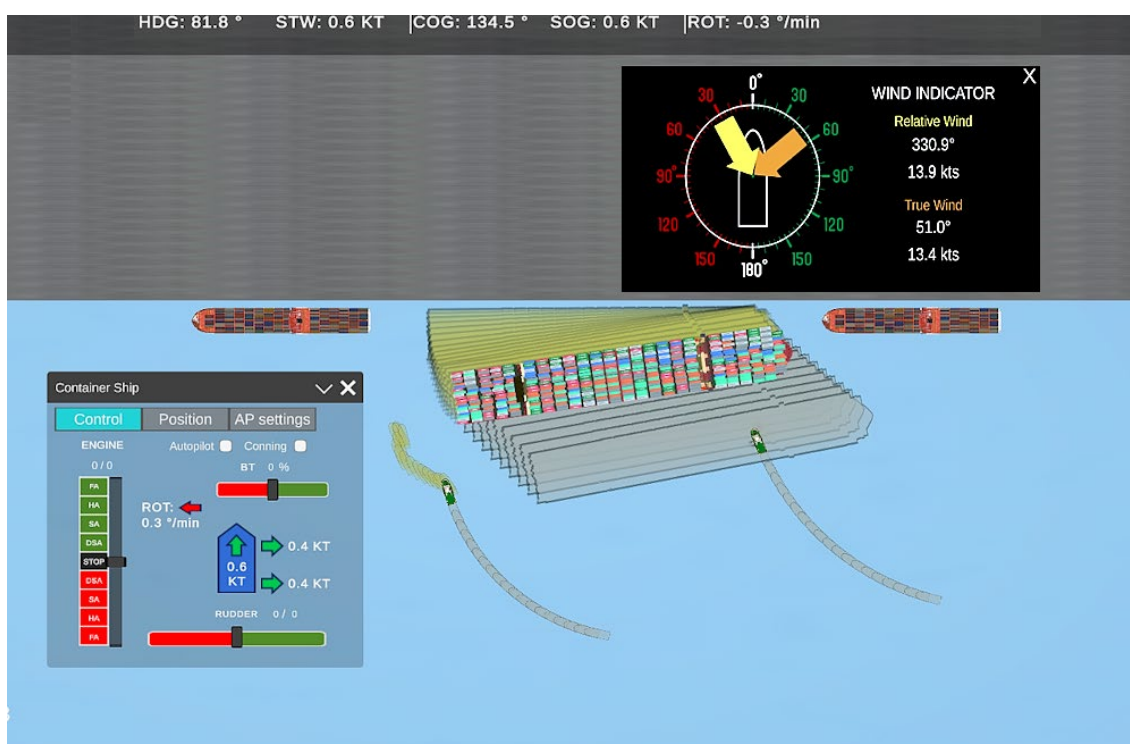


Рисунок 5.23 – Вид зверху: процес буксирування великотоннажного контейнеровоза від причалу без власного ходу за допомогою двох ASD буксирів в режимі тяги під дією вітру 51° і швидкістю 13,4 вузли

На рис. 5.23 показано вид зверху процесу відтягування судна від причалу. Прогнозована траєкторія зображена у вигляді двовимірних корпусів судна сірим кольором, тоді як фактично пройдена жовтим. На двовимірному зображенні відсутнє зображення буксирних ліній. Поточні параметри судна, такі як курс, швидкість і швидкість повороту, відображаються на верхній панелі. Праворуч на чорній панелі показаний індикатор вітру. Панель керування судном відображається в нижньому лівому куті.

За показаннями панелі керування видно, що судно не використовує власну силову установку чи носовий підрулювач. Бічне зміщення судна, обумовлене результуючою силою від взаємодії з буксирами і вітром, відбувається зі швидкістю 0,4 вузла. Крім того, прогнозована траєкторія показує, що судно отримало поздовжнє прискорення, яке кормовий буксир компенсує збільшенням сили натягу, тоді як носовий буксир зменшує її, про що свідчать траєкторії на рис. 5.24. Після того, як великотоннажний контейнеровоз був відтягнутий від причалу приблизно на одну довжину корпусу судна, кормовий буксирний трос був відданий.



Рисунок 5.24 – Моделювання маневрування судна з буксирами: відхід від причалу з прогнозуванням траєкторії – кормовий буксирний трос відданий

На наступному етапі даного сценарію буксири повертають великотоннажний контейнеровоз для його подальшого виходу з гавані. Кормовий буксир підходить до правої чверті з метою штовхання судна, тоді як носовий буксир продовжує тягнути носову частину судна праворуч для повороту судна. З прогнозованої траєкторії судна, зображеної на рис. 5.24, видно, що судно отримало поздовжнє від'ємне прискорення. Для компенсації руху назад, а також з метою прискорення повороту судна, виконано короткочасну команду Dead Slow Ahead при максимальній перекладці пера стерна на правий борт, після чого двигун зупинено з нейтральним положенням пера стерна. Даний етап відображено на рис. 5.25 та рис. 5.26.

В результаті спільного впливу власного маневру судна та результуючої сили від штовхаючих і тягових дій буксирів, судно досягло достатньої поздовжньої та кутової швидкості для більш ефективного повороту (рис. 5.25). Щоб уникнути нагромадження, візуалізація траєкторій буксирів на рис. 5.25–5.26 вимкнена.



Рисунок 5.25 – Вид зверху: моделювання процесу повороту великотоннажного контейнеровоза за допомогою двох буксирів, один працює у режимі штовхання, інший – у режимі тягання

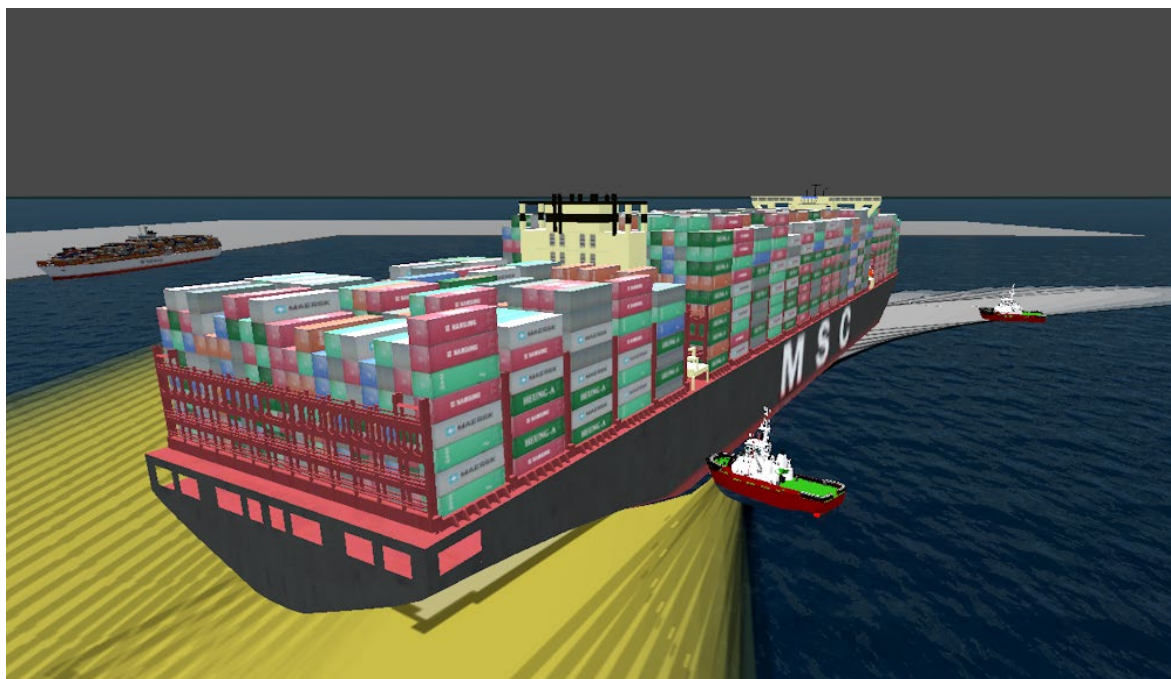


Рисунок 5.26 – Моделювання процесу виконання повороту великотоннажного контейнеровозу за допомогою двох буксирів, коли один з них працює у режимі штовхання, а інший – у режимі тягання

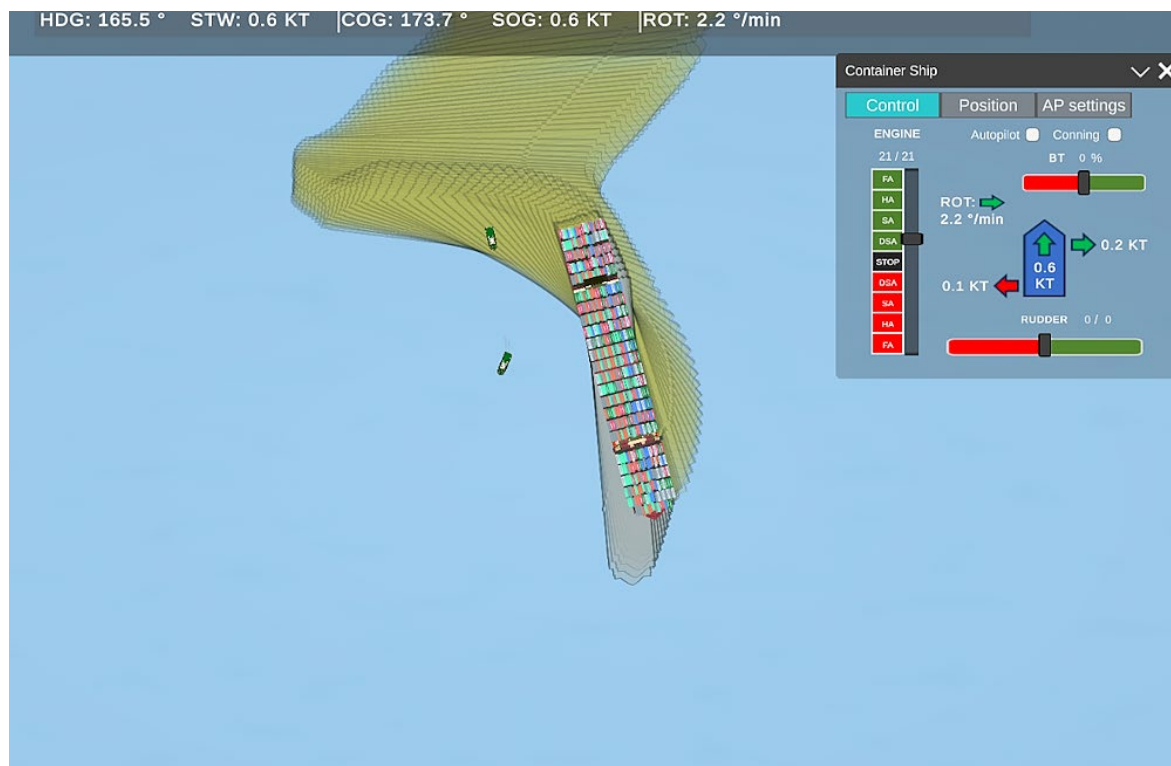


Рисунок 5.27 – Вид зверху: прогнозування траєкторії маневрування великотоннажного контейнеровоза після віддачі обох буксирів



Рисунок 5.28 – Вид зверху: моделювання виходу великотоннажного контейнеровозу і гавані після віддачі обох буксирів

На наступному етапі кормовий буксир припиняє штовхати великотоннажний контейнеровоз, а носовий буксир поступово зменшує силу нятягу, готуючись до віддачі носового буксирного троса. Після віддачі носового буксира судно має кутову швидкість $2,2^{\circ}/\text{хв}$ та швидкість $0,6$ вузла (рис. 5.27).

Після віддачі обох буксирів судно поступово збільшує швидкість на Dead Slow Ahead з нейтральним положенням пера стерна та виходить з гавані, що відображено на рис. 5.28.

Проведене моделювання маневрування великотоннажного контейнеровоза, який відходить від причалу в умовах вітрового навантаження за допомогою двох буксирів, що працюють у різних режимах роботи, в режимі реального часу в середовищі розробки продемонструвало ефективну роботу запропонованого алгоритму прогнозування траєкторії на основі математичних моделей руху судна та його взаємодії з буксирами в межах даного дослідження. Оцінка результатів моделювання зведена до табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати прогнозування траєкторії на основі математичної моделі

Порядковий номер сценарію	Параметр	Значення
1	Середнє відхилення швидкості	0,02 вуз
	СКВ позиції судна	3,4 м
	СКВ курсу судна	0,05°
2	Середнє відхилення швидкості	0,01 вуз
	СКВ позиції судна	5,3 м
	СКВ курсу судна	1,4°
3	Середнє відхилення швидкості	—
	СКВ позиції судна	3,1 м
	СКВ курсу судна	0,5°

На основі результатів імітаційного моделювання можна зробити висновок, щодо можливостей практичного застосування запропонованого алгоритму в контексті вдосконалення як судових систем підтримки прийняття рішень, так і підходів до морської освіти та навчання.

5.3 Прогнозування траєкторії судна в контексті судової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами

Для зниження впливу людського фактору та покращення інформаційного забезпечення судноводіїв в сучасних умовах інтенсивного судноплавства необхідно прискорити як розвиток існуючих навігаційних систем, так і створення нових. У цьому контексті пропонується покращити судові системи підтримки прийняття рішень за допомогою розробленого в цьому дослідженні алгоритму прогнозування траєкторії для оцінки ефективності маневру і надання

відповідних інформаційних рекомендацій операторам суден під час спільного маневрування з буксирами.

Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами [150] належить до засобів інформаційного забезпечення керування рухом судна при виконанні спільного маневрування судна разом із буксирами та використовується як засіб оцінки спільного маневру судна та буксирів в режимі реального часу, отримання відповідних рекомендацій для реалізації безпечного маневру та корегування його параметрів, базуючись на статичних й динамічних даних елементів системи судно-буксири, отримуваних з суднового навігаційного обладнання.

В основу концепції поставлено завдання удосконалення існуючих суднових систем навігаційного містка, а саме створення пристрою для інформаційного забезпечення процесу керування судном під час спільного маневрування з буксирами, шляхом імплементації комплексної обробки як динамічних даних руху судна й буксирів, так і відповідних статичних параметрів судна й буксирів (розміри, потужність пропульсивної установки, тощо), для реалізації засобів забезпечення судноводія інформацією щодо виконання спільного маневру судна та буксирів в режимі реального часу, відповідної оцінки такого маневру для безпеки маневрування, а також для надання свідчих даних при вирішуванні інцидентів на морі. На рис. 5.29 наведена функціональна схема моделі суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами.

Апаратно-програмні компоненти, встановлені на буксирі (клієнтський блок), складаються з модуля передачі даних та обчислювального пристрою, наприклад портативного комп'ютера або планшета з встановленим відповідним програмним забезпеченням. Клієнтське програмне забезпечення відповідає за авторизацію буксира в системі, прийом і передачу доступної інформації від модуля передачі даних, а також отримання даних від сервера для синхронізації пристрою.

Апаратно-програмні компоненти, встановлені на судні (сервері), включають модуль передачі даних і обчислювальний пристрій, який, на відміну від клієнтського блоку, оснащений розширеним програмним забезпеченням. Серверне програмне забезпечення отримує дані від клієнтських модулів, обробляє їх відповідно до встановленого завдання та передає користувачам інформацію для перевірки синхронізації. Додатково в модель входить модуль для налаштування зовнішніх параметрів (вітер, течія, хвилі), представлений у вигляді програмного додатку для серверного програмного забезпечення.

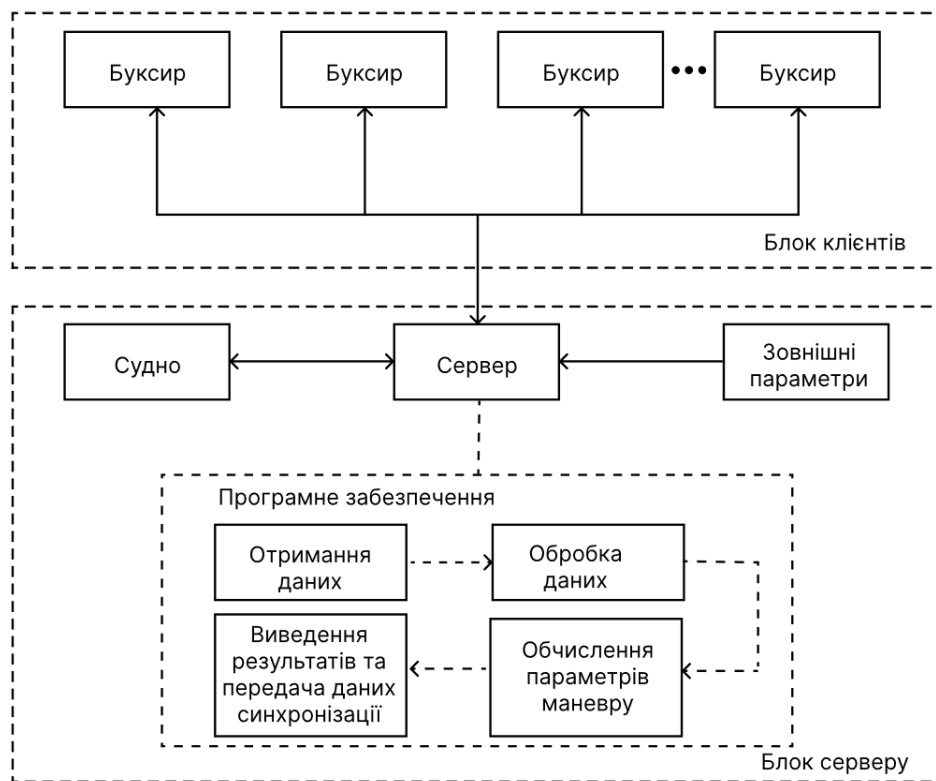


Рисунок 5.29 – Функціональна схема суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами

Контроль за рухом системи «судно-буксир» починається з авторизації запланованої кількості буксирів через клієнтське програмне забезпечення з урахуванням вхідних даних від клієнтів буксира в режимі реального часу і триває до досягнення системою «судно-буксир» кінцева точка. Після авторизації всіх запланованих буксирів у системі через підтвердження на клієнтському

програмному забезпеченні відбувається обмін даними між клієнтськими модулями та сервером. Програмне забезпечення сервера аналізує поточну ситуацію та порівнює її із запланованим маршрутом маневрування, враховуючи встановлені зовнішні параметри, дані, отримані від власного модуля передачі даних судна, а також від буксирів, враховуючи їх статичні дані, попередньо налаштовані оператором, такі як максимальна потужність двигуна, параметри циркуляції та гальмування, потужність двигуна та положення структурно призначених точок для буксирних операцій на корпусі судна. Дані про маневрування можуть зберігатися в пам'яті сервера як додатковий ресурс для зберігання електронних доказів до їх видалення користувачем або системою в режимі реєстратора рейсових даних (VDR – Voyage Data Recorder).

5.4 Врахування взаємодії судна з буксирами при маневруванні та прогнозування траєкторії судна в контексті розвитку сучасних підходів до морської освіти та підготовки

З розвитком комп'ютерних технологій, штучного інтелекту та нових концепцій навчання, морська освіта та підготовка поступово наближаються до порогу фундаментальних змін, які набувають все більшої популярності та розвитку. Незважаючи на те, що сучасні винаходи пропонують різні варіанти використання певних інструментів, останні дослідження демонструють зростаючу тенденцію невизначеності щодо формування інноваційного підходу до навчання [44].

Міжнародна конвенція про підготовку, дипломування та несення вахти (STCW) встановлює глобальні стандарти для освіти та професійної підготовки моряків. Згідно з вимогами Манільських поправок 2010 року, офіцери повинні бути обізнані про принципи управління ресурсами містка (BRM – Bridge Resource Management). Ця вимога може бути виконана шляхом проходження затвердженого тренінгу з BRM або навчання на тренажері та демонстрації компетентності в цій області (Кодекс STCW з поправками, таблиця А-11/1) [31].

Конвенція STCW також передбачає використання тренажерів для підготовки моряків у правилі I/12 «Використання тренажерів» і розділі A-I/12 «Стандарти, що визначають використання тренажерів», B-I/12 «Керівництво стосовно використання тренажерів Кодексу STCW». Навчання з управління судном та управління ресурсами містка (BRM) є критично важливим для розвитку навичок та компетенцій членів команди містка, включаючи ситуаційну обізнаність, комунікацію, прийняття рішень, командну роботу та лідерство. Для проведення курсів BRM зазвичай використовується повномасштабний навігаційний тренажер. Проте одним із обмежень підготовки з BRM на тренажері є відсутність реальної взаємодії між усіма залученими сторонами. Навіть якщо призначений лоцман, управління буксиром часто відображається у вигляді вектора на дисплеї електронної карти або автоматично виконується тренажером. Дії швартовних команд зазвичай взагалі не розглядаються в більшості сучасних навчальних програм з BRM [92]. Однак подібні сценарії можуть покращити якість підготовки членів команди містка, лоцманів та капітанів буксирів. Дослідження основних факторів ризику, що впливають на роботу буксирів у порту Гаосюн, показало, що оператори буксирів схильні до помилок у судженнях, втоми на роботі та нестачі навичок [77]. Згідно з аналізом [119], рівень навичок капітанів суден і портових лоцманів впливає на оптимізацію роботи портових буксирів. Керованість і остійність буксирів під час операцій з буксируванням об'єктом є критичними характеристиками, які необхідно враховувати. Загалом, під час буксирування можуть статися такі аварії [98]: гіртинг, зіткнення або контакт, розрив буксирного троса, посадка на мілину буксира або буксируваного об'єкта, відмова головного двигуна, електричної системи, системи керування або критичних систем, людина за бортом тощо. Незважаючи на інструкції з безпеки під час навчання екіпажу буксира, згідно з аналізом розслідувань морських аварій [59], [60], [61], [117], [118], питання запобігання виникненню ситуації гіртингу залишається невирішеним [43].

Таким чином розширене навчання з управління морськими ресурсами, в якому беруть участь оператори буксирів і, при необхідності, керівники швартовних бригад, може бути кращою альтернативою. Імітація взаємодії між містком судна, буксирами та швартовними командами могла б підвищити якість підготовки палубних офіцерів, лоцманів та капітанів буксирів. Крім того, імітація комунікації та координації з буксирами може покращити результати навчання членів команди містка та лоцманів, покращивши їх розуміння ролі та обмежень буксирів, а також власних обов'язків та очікувань. Вони також можуть практикуватися в реагуванні на аварійні ситуації з буксирами, такі як втрата потужності, обрив буксирного троса або зіткнення, і розвинути навички стійкості, такі як адаптивність, гнучкість та креативність, вирішуючи складні та динамічні ситуації, що вимагають роботи з буксирами [92].

Через характер обов'язків палубних офіцерів (усіх рівнів: від 3-го помічника до капітана) відсутність досвіду управління судном може стати серйозною проблемою для морської галузі. Палубні офіцери рідко управляють судном в обмежених водах, і на практиці, поки це роблять капітани, вони часто лише дотримуються команд лоцмана на стерно та у машинне відділення. Управління судном – складна і відповідальна задача, що вимагає високого рівня кваліфікації та досвіду. Без належної підготовки та досвіду палубним офіцерам може бути важко ефективно управляти суднами в складних обмежених умовах, що збільшує ризик інцидентів [92].

Для вирішення цієї проблеми важливо забезпечити адекватну підготовку для покращення навичок управління судном за допомогою поєднання різних підходів і методів, таких як програми для настільних комп'ютерів та веб-додатки, звичайні повномасштабні та VR навігаційні тренажери. Крім того, важливо враховувати просторову обізнаність, яка є важливою навичкою для морських операцій, оскільки дозволяє членам команди містка зберігати ситуаційну обізнаність, планувати і виконувати маневри, уникати зіткнень і забезпечити безпечне плавання. Просторову обізнаність можна розвивати та

вдосконалювати за допомогою підготовки, особливо за допомогою тренажерів, які можуть забезпечити реалістичні імерсивні сценарії. Однак просторова обізнаність у VR-тренажерах та звичайних повномасштабних тренажерах відрізняються ступенем реалізму та імерсивності, які вони пропонують [92], [91].

Хоча системи віртуальної реальності (VR) забезпечують реалістичний досвід, розширюючи межі сучасної освітньої системи в морській галузі, імітація руху у VR-просторі часто може призводити до таких симптомів морської хвороби, як нудота, запаморочення, головний біль та втома. При використанні VR-шолома (HMD) очі реєструють симульовані рухи навколо, а звукові ефекти підвищують ступінь реалізму. Незважаючи на ефекти, створені VR-сценами, м'язи та суглоби тіла не відчують свого руху. Простими словами, взаємне сприйняття, сформоване очима та вухами, не відповідає реальному стану тіла. Таким чином, нервові сигнали, що надсилаються до мозку, провокують дезорієнтацію, викликаючи морську хворобу. Методи зменшення хвороби були запропоновані на основі індукції погляду користувача за допомогою візуального гіда [127]. Згідно з [105], візуально-вестибулярний конфлікт залежить від типу контенту (рухомий або статичний). Порівняння оброблених даних показує, що контент є основним фактором, який впливає на симптоми VR-хвороби. Інше дослідження розглянуло три можливі чинники VR-хвороби: апаратне забезпечення, контент та людські фактори [13]. Результати дослідження показали, що не один, а кілька факторів VR-систем впливають на сприйняття користувача, що може призвести до дискомфорту [49].

Сучасне дистанційне навчання на основі інтернет-технологій широко використовується для навчання та професійної підготовки, демонструючи не лише високий рівень ефективності, але й позитивні відгуки студентів [2], [44], [94], [123]. Важливо підкреслити, що для досягнення повного потенціалу навичок управління судном і BRM у процесі навчання слід використовувати весь набір доступних технологій у наступному або взаємозамінному модульному порядку [92]:

1. Теоретична підготовка за допомогою персоналізованого дистанційного навчання на основі інтернет-технологій.

2. Практичні заняття з використанням персоналізованих програм для настільних комп'ютерів та веб-додатків, у яких учні повинні виконувати чітко визначені вправи для відточування певних навичок (наприклад, маневрування на низькій швидкості, рух лагом, розворот на місці тощо).

3. Сесії питань і відповідей та розбори вправ з кваліфікованими інструкторами.

4. Підготовка з управління судном на повномасштабному або VR-тренажері під керівництвом кваліфікованого інструктора.

5. Підготовка з управління судном на повномасштабному тренажері або комбінованому багатостанційному VR-тренажері з управління судном із залученням усіх сторін (команда містка, лоцман, капітани буксирів).

Описаний підхід впроваджується в НУ «Одеська морська академія» з використанням навчальних програм Learnmarine, пов'язаних з управлінням суднами і крановими операціями.

Мета першого етапу полягає в тому, щоб закласти основу для подальшого навчання. Доцільною та зручною є можливість надавати слухачам можливість вчитися у власному темпі та повертатися до певних матеріалів протягом або навіть після курсу. За такою схемою електронне навчання підходить найкраще.

Другий етап націлений на те, щоб дати слухачам можливість відточувати свої практичні навички у власному темпі і працювати стільки часу, скільки їм потрібно, що можна зробити за допомогою WebGL, RDP (протокол віддаленого робочого столу) або аналогічних технологій. Маневрування суднами будь-якого розміру в режимі реального часу займає години, а відпрацювання маневрування – дні. Слухачі зазвичай не мають такої можливості у звичайному академічному середовищі.

Етапи 1 і 2 реалізуються за допомогою LMS (Learning Management System – система управління навчанням) як поєднання електронного навчання та

технології WebGL. Слухачі мають доступ до навчального контенту протягом усього періоду навчання. Протягом цього періоду студенти повинні пройти тести з множинним вибором та виконати спеціально розроблені вправи у додатку WebGL, використовуючи свої персональні пристрої (як правило, ноутбук).

Консультації та настанови спеціалістів у даній області (subject matter expert, SME) необхідні на третьому етапі і повинні бути доступні протягом усього навчання. Консультація може проходити як у фізичному, так і у віртуальному класі за допомогою програмного забезпечення для відеоконференцій (наприклад, Zoom, MS Teams, Google Meet).

Нестачу просторового сприйняття і того, що називають «почуттям інерції судна», можна компенсувати за допомогою повномасштабного тренажера навігаційного містка, змішаної або віртуальної реальності на етапі 4. Важливою особливістю є те, що у кожного слухача має бути можливість практикуватися індивідуально, що у випадку повномасштабного тренажера не є економічно ефективним. Однак використання окремих бездротових VR-гарнітур з джойстиками є прийнятним варіантом через набагато меншу вартість і вимоги до простору.

П'ятий етап передбачає присутність всієї команди маневрування, де можна використовувати або комбінацію станцій XR-тренажера, або повномасштабні тренажери. Останній варіант є досить вимогливим з точки зору вартості і необхідного простору.

Етапи 4 та 5 вимагають фізичної присутності слухачів у навчальному центрі та відповідного обладнання.

Таким чином, для забезпечення повномасштабного тренування із залученням взаємодії операторів як суден, так і буксирів доцільно розглянути структуру мультистанційного тренажера з управлінням судном. Структура комунікації однакова як для повномасштабного випадку, так і для випадку розширеної реальності (рис. 5.30) [43], [91], [92]:

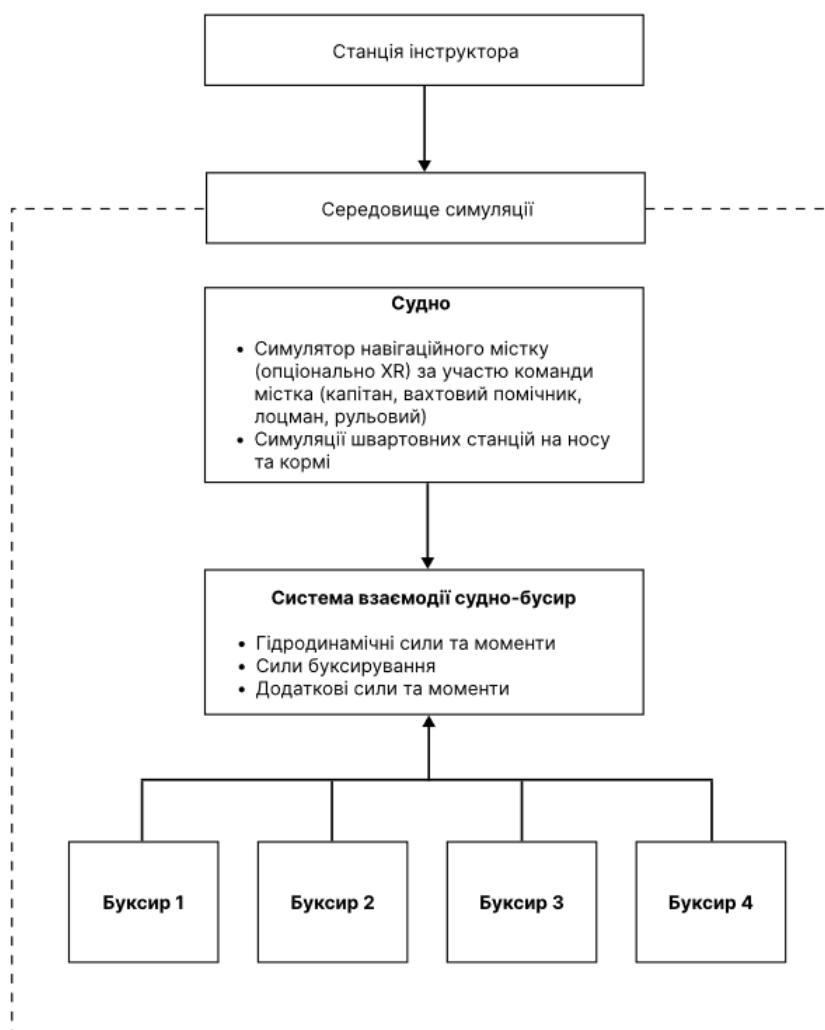


Рисунок 5.30 – Схематичне зображення архітектури мультистанційного тренажера з управління судном

1) інструктор є основним клієнтом, якому доручено почати вправу (створити середовище), а також контролювати зовнішні умови, дані слухачів і записи про дії. Крім того, інструктор має доступ до серверних даних;

2) тренажер навігаційного містка – це простір всередині середовища, створений інструктором. До команди містка можуть підключитися до 4 користувачів. У цьому випадку судно відчуває взаємодію із зовнішніми умовами та супроводжуючими або буксирувальними суднами;

3) опціонально можуть бути підключені 2 окремі станції, що представляють керівників команд носової і кормової швартовних станцій у відповідних віртуальних просторах.

4) простори буксирних суден призначені для залучення капітанів буксирів у навчальний процес. У цьому прикладі всередині середовища може бути створено до 4 окремих просторів. Буксири взаємодіють з судном в залежності від поставленого завдання (супровід, штовхання, тягання або комбінація).

Результатом взаємодії є реалістична поведінка декількох суден, що наближує сприйняття до реальної ситуації. Додаткова інтеграція алгоритму прогнозування траєкторії руху судна, заснованого на математичних моделях руху судна та взаємодії судна з буксирами, спрямована на запобігання розвитку небезпечних ситуацій на етапі навчання. Таким чином, студенти матимуть змогу безпечно отримати досвід розуміння поведінки судна за різних умов, що дозволить їм у певній мірі прогнозувати його рух навіть без системи підтримки прийняття рішень та, як наслідок, уникати розвитку небезпечних сценаріїв.

5.5 Висновки до п'ятого розділу

В цьому розділі представлено імітаційну модель у тривимірному середовищі для моделювання маневрування великотоннажного контейнеровоза та буксирів в режимі реального часу із прогнозуванням траєкторії на основі математичних моделей і алгоритмів, викладених у попередніх розділах.

Сконфігуроване середовище моделювання базується на використанні тривимірних моделей великогабаритного контейнеровоза та буксира з азимутальними підрулювачами, акваторії порту, буїв та відповідних моделей руху судна, їх взаємодії, а також інтегрованого алгоритму для обчислення прогнозованої траєкторії для імітації сценаріїв маневрування. Перевірку алгоритму прогнозування траєкторії проводили шляхом порівняння прогнозованих координат моделі великотоннажного контейнеровоза, розрахованих асинхронно на заданому інтервалі часу, з фактично пройденими координатами з урахуванням обробки фізичних залежностей у обраному середовищі розробки. Верифікація підтвердила ефективність запропонованого алгоритму в рамках поставлених перед даним дослідженням завдань.

На основі результатів проведеного імітаційного моделювання можна зробити висновок, що запропонований в попередніх розділах алгоритм прогнозування траєкторії руху судна, що відрізняється використанням уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, з урахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи може бути використаний для покращення як систем підтримки прийняття рішень, так і підходів до морської освіти та підготовки.

В даному розділі також запропонована архітектура моделі суднової суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами на основі математичних моделей і алгоритмів, викладених у попередніх розділах.

У контексті вдосконалення підходів до морської освіти та підготовки судноводіїв, наголошено на трансформаційному потенціалі сучасних імітаційних технологій. Була запропонована багаторівнева структура навчання, яка охоплює процес від теоретичного електронного навчання до комплексного моделювання у віртуальній реальності. Було підкреслено недоліки поточних підходів до курсу BRM, зокрема відсутність реальної взаємодії між усіма залученими сторонами (команда мосту, лоцмана, капітани буксиру тощо). Щоб вирішити цю проблему, у розділі представлено архітектуру багатостанційного навігаційного симулятора для обробки суден, призначеного для відтворення реалістичної поведінки кількох суден, таким чином наближаючи сценарії реального світу.

Додаткова інтеграція алгоритму прогнозування траєкторії, заснованого на математичних моделях руху судна та взаємодії з буксиром, спрямована на запобігання розвитку небезпечних ситуацій під час навчання. Це дозволяє студентам безпечно отримати досвід у розумінні поведінки корабля за різних умов, дозволяючи їм певною мірою передбачити його рух навіть без системи підтримки прийняття рішень і, отже, уникнути розвитку небезпечних сценаріїв.

Зміст даного розділу викладено в роботах [43], [44], [49], [91], [92], [150].

ВИСНОВКИ

1. Оцінка стану питання. Контейнерні судна відіграють важливу роль у міжнародних морських торгівельних відносинах. Такі фактори як збільшення розмірів контейнерних суден, а також зростання контейнерного флоту мають значний вплив на безпеку судноплавства. Через скорочення екіпажів, робота моряка вимагає ще більшої концентрації відповідальності від меншої кількості людей, що може призводити до підвищення ризиків розвитку аварійних ситуацій. Згідно з результатами статистичних досліджень, розвиток аварійних ситуацій на морі на 88,9 % спричинюється помилковими діями людини. Для великотоннажних контейнеровозів до найбільш складних етапів переходу можуть бути віднесені як безпосередньо маневрування у стислих водах, підхід до причалу, так і виконання безпечних швартовних операцій. Оскільки не всі порти належним чином обладнані для розміщення та обробки суден цього типу, не завжди можливо забезпечити безпечні умови експлуатації. Наприклад, збільшення кількості контейнерів, розміщених на палубі, пропорційно збільшує площу вітрильності судна, що призводить до більшого опору повітря, що може підвищувати ризики навігаційних інцидентів. Таким чином, сучасний запит практики вимагає підвищення безпеки судноплавства в умовах обмежених можливостей ефективного самостійного маневрування надвеликих суден у портових акваторіях. Це також підкреслює необхідність враховувати сили та моменти взаємодії між судном і буксирами при плануванні та виконанні маневрів, оскільки залучення буксирів є важливою умовою для безпечного проходу великотоннажних суден у портових водах. В свою чергу, аналіз наявних досліджень свідчить про недостатню вивченість керованості великотоннажних контейнеровозів у контексті підвищення безпеки їх маневрування. Таким чином, основний науковий напрямок дослідження, що полягає в удосконаленні процесів та засобів, спрямованих на підвищення безпеки маневрування великотоннажних

контейнеровозів у портових акваторіях, є актуальним і перспективним науковим напрямком.

2. Формулювання вирішеної наукової задачі та її значення для науки і практики. В результаті вирішення головної наукової задачі отримано алгоритм прогнозування траєкторії руху судна, зокрема при спільному маневруванні із буксирами, що базується на основі уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, що працюють у різних режимах роботи і з урахуванням параметрів їх маневреності.

У дисертаційній роботі:

- удосконалено методику верифікації математичної моделі плоского руху судна, яка відрізняється алгоритмом застосування методів оптимізації, що дозволяє отримувати більш надійні результати при уточненні гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за даними морських випробувань;
- удосконалено математичну модель взаємодії судна з буксиром, яка відрізняється врахуванням результуючих сил і моментів, коли в процесі маневрування беруть участь кілька буксирів, що працюють в різних режимах;
- вперше побудовано алгоритм прогнозування траєкторії руху судна, що відрізняється використанням уточнених гідродинамічних коефіцієнтів математичної моделі руху судна за удосконаленою методикою верифікації моделі його плоского руху, а також математичної моделі взаємодії судна з буксирами, з урахуванням обмежень маневреності буксирів, що працюють у різних режимах роботи.

Наукова значимість даного дисертаційного дослідження полягає у отриманні алгоритму прогнозування траєкторії руху судна, також при спільному маневруванні із буксирами, із використанням уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами, що працюють у різних режимах роботи і з урахуванням параметрів їх маневреності, а практична цінність зумовлена тим, що результати дослідження можуть бути використані

при розробці суднових систем підтримки прийняття рішень, а також при навчанні, підготовці та підвищенні кваліфікації судноводіїв.

Економічна ефективність даного дисертаційного дослідження полягає в тому, що удосконалення суднових систем підтримки прийняття рішень, шляхом впровадження нових алгоритмів прогнозування траєкторії руху, а також покращення існуючих освітніх інструментів у відповідності до сучасного рівня, можуть відігравати значну роль у запобіганні виникненню й протидії аварійним ситуаціям, та, як наслідок, можуть зменшити матеріальні витрати і негативний екологічний ефект на довкілля.

Отриманим науковим результатам даної дисертаційної роботи притаманна наукова новизна, що також підтверджується патентом на корисну модель [150].

3. Висновки і рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів. Основні теоретичні і практичні результати, отримані в даному дисертаційному дослідженні, можуть бути впроваджені на контейнерні судна в контексті систем підтримки прийняття рішень, а також при навчанні, підготовці та підвищенні кваліфікації судноводіїв з метою підвищення ефективності і безпеки судноплавства, а також зменшення впливу людського фактору при маневруванні великотоннажних контейнеровозів у портових водах. Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами, запропонована в даному дослідженні, належить до засобів інформаційного забезпечення керування рухом судна при виконанні спільного маневрування судна разом із буксирами та може бути використана як засіб оцінки спільного маневру судна та буксирів в режимі реального часу, базуючись на статичних й динамічних даних елементів системи судно-буксир, отримуваних з суднового навігаційного обладнання. Дані про маневрування можуть зберігатися в пам'яті сервера як додатковий ресурс для зберігання електронних доказів до їх видалення користувачем або системою в режимі реєстратора рейсових даних (VDR).

З іншого боку, з розвитком комп'ютерних технологій, штучного інтелекту та нових концепцій навчання, морська освіта та підготовка поступово наближаються до порогу фундаментальних змін, які набувають все більшої популярності та розвитку. Незважаючи на те, що сучасні винаходи пропонують різні варіанти використання певних інструментів, останні дослідження демонструють зростаючу тенденцію невизначеності щодо формування інноваційного підходу до навчання. В цьому контексті, імітація взаємодії між містком судна, буксирами та швартовними командами могла б підвищити якість підготовки палубних офіцерів, лоцманів та капітанів буксирів. Крім того, імітація комунікації та координації з буксирами може покращити результати навчання членів команди містка та лоцманів, покращивши їх розуміння ролі та обмежень буксирів, а також власних обов'язків та очікувань. Вони також можуть практикуватися в реагуванні на аварійні ситуації, такі як втрата потужності, обрив буксирного троса або зіткнення, і розвинути навички стійкості, такі як адаптивність, гнучкість та креативність, вирішуючи завдання у складних та динамічних ситуаціях. Для вирішення цієї проблеми важливо забезпечити адекватну підготовку для покращення навичок управління судном за допомогою поєднання різних підходів і методів, таких як програми для настільних комп'ютерів та веб-додатки, звичайні повномасштабні та VR навігаційні тренажери. В цьому аспекті, інтеграція алгоритму прогнозування траєкторії, заснованого на математичних моделях руху судна та взаємодії з буксиром, спрямована на запобігання розвитку небезпечних ситуацій під час навчання. Це дозволяє студентам безпечно отримати досвід у розумінні поведінки судна за різних умов, дозволяючи їм певною мірою передбачити його рух навіть без системи підтримки прийняття рішень і, отже, уникнути розвитку небезпечних сценаріїв. Також в роботі запропонована багаторівнева структура навчання, яка охоплює процес від теоретичного електронного навчання до комплексного моделювання у віртуальній реальності. Було підкреслено недоліки поточних підходів до курсу BRM, зокрема відсутність реальної взаємодії між усіма

залученими сторонами (команда мосту, лоцмана, капітани буксиру тощо). Щоб вирішити цю проблему, в роботі було запропоновано архітектуру багатостанційного навігаційного симулятора для обробки суден, призначеного для відтворення реалістичної поведінки кількох суден, таким чином наближаючи сценарії реального світу.

4. Якісні та кількісні показники отриманих результатів. Якісними показниками результатів даної дисертаційної роботи є удосконалена методика верифікації математичної моделі плоского руху судна; удосконалена математична модель взаємодії судна з буксиром; алгоритм прогнозування траєкторії руху судна, зокрема при спільному маневруванні із буксирами, що базується на основі уточненої математичної моделі руху судна та математичної моделі взаємодії судна з буксирами; модель суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами.

Кількісними показниками є гідродинамічні коефіцієнти математичної моделі руху судна; чисельні результати моделювання руху судна, а саме швидкості, оберти, відстані; кількість буксирів, залучених до маневрування; відхилення швидкостей при уточненні моделі; похибки розрахунку дистанції при уточненні моделі; висув; тактичний діаметр циркуляції; кути зарискування; СКВ позиції судна; СКВ курсу судна; відхилення при прогнозуванні руху, а саме відхилення швидкості, СКВ позиції та СКВ курсу.

5. Обґрунтування достовірності отриманих результатів. Верифікація отриманих в даному дисертаційному дослідженні результатів виконана шляхом імітаційного моделювання на прикладі ULCS «MSC Nela» за допомогою програмного забезпечення MATLAB, також із застосуванням середовища Simulink, і Unity, для виконання відповідної симуляції в реальному часі. Сконфігурована модель великотоннажного контейнеровоза була інтегрована в програмне забезпечення NavSimulator компанії Learnmarine, яке включає верифіковану модель буксира з азимутальними рушіями, враховуючи остійність.

Для візуалізації результатів імітаційного моделювання також були використані відповідні тривимірні моделі ULCS та буксирів.

Таким чином, обґрунтовується достовірність отриманих результатів даного дисертаційного дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] C. Aage, S. L. Hvid, P. H. Hughes, and M. Leer–Andersen, “Wind loads on ships and offshore structures estimated by CFD,” in *Proc. 8th Int. Conf. Behaviour Offshore Struct.*, Delft, Netherlands, 1997. Online. Available: DTU Orbit.
- [2] J. Abercrombie, “Seafarer Training in the Age of Autonomy,” in *The 1st International Conference on Maritime Education and Development*, S. Bauk and S. D. Ilčev, Eds. Cham: Springer, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-64088-0_14.
- [3] American Bureau of Shipping, *Guide for Vessel Maneuverability*, Houston, TX, USA, 2006. Online. Available: ABS.
- [4] I. M. V. Andersen, “Wind forces on container ships,” Mercator, Marts, 2016. Online. Available: DTU Orbit.
- [5] I. M. V. Andersen, “Wind loads on post–panamax container ship,” *Ocean Eng.*, vol. 58, pp. 115–134, 2013. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.008.
- [6] J. Artyszuk, “Steady–state maneuvering of a generic ASD tug in escort pull and bow–rope aided push operation,” *TransNav*, vol. 8, no. 3, pp. 449–457, 2014. DOI: 10.12716/1001.08.03.17.
- [7] J. Bi, H. Cheng, W. Zhang, K. Bao, and P. Wang, “Artificial Intelligence in Ship Trajectory Prediction,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 5, p. 769, May 2024. DOI: 10.3390/jmse12050769.
- [8] W. Blendermann, “Estimation of wind loads on ships in wind with a strong gradient,” in *Proc. Int. Conf. Ocean Offshore Arctic Eng.*, 1995, vol. 1A, pp. 271–277.
- [9] W. Blendermann, “Parameter identification of wind loads on ships,” **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 51, no. 3, pp. 339–351, 1994. doi: 10.1016/0167–6105(94)90067–1.
- [10] Borkowski, “LSTM model for AIS data,” *IEEE Access*, 2017.
- [11] P. Bradner and M. Renilson, “Interaction between two closely spaced azimuthing thrusters,” *J. Ship Res.*, vol. 42, no. 1, pp. 15–32, 1998.
- [12] P. A. Brandner, “Performance and effectiveness of omni–directional stern drive tugs,” Ph.D. dissertation, Univ. Tasmania, Tasmania, Australia, 1995.

- [13] E. Chang, T. H. Kimb, and B. Yoo, “Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements,” *International Journal of Human–Computer Interaction*, vol. 36, no. 17, pp. 1658–1682, 2020. doi: 10.1080/10447318.2020.1778351.
- [14] *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*, 1972 (COLREGs).
- [15] J. Dang and H. Laheij, “Hydrodynamic aspects of steerable thrusters,” presented at the *Dynamic Positioning Conf.*, 2004.
- [16] European Maritime Safety Agency (EMSA), *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2020*, Lisbon, Portugal, 2020. Online. Available: EMSA.
- [17] European Maritime Safety Agency (EMSA), *Preliminary Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2014–2020*, Lisbon, Portugal, 2021. Online. Available: EMSA.
- [18] European Maritime Safety Agency (EMSA), *Safety Analysis of Data Reported in EMCIP – Analysis on Marine Casualties and Incidents involving Container Vessels*, Lisbon, Portugal, 2020. Online. Available: EMSA.
- [19] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021. DOI: 10.1002/9781119994138.
- [20] T. Fujiwara, Y. Tsukada, F. Kitamura, H. Sawada, and S. Ohmatsu, “Experimental Investigation and Estimation on Wind Forces for a Container Ship,” in *Proc. 19th Int. Offshore Polar Eng. Conf.*, Osaka, Japan, June 21–26, 2009.
- [21] T. Fujiwara, M. Ueno, and Y. Ikeda, “A New Estimation Method of Wind Forces and Moments acting on Ships on the basis of Physical Component Models,” *J. Japan Soc. Naval Architects Ocean Eng.*, vol. 2, pp. 243–255, 2005. DOI: 10.2534/jjasnaoe.2.243.
- [22] T. Fujiwara, M. Ueno, and T. Nimura, “Estimation of Wind Forces and Moments acting on Ships,” *J. Soc. Naval Architects Japan*, vol. 183, pp. 77–90, 1998.
- [23] V. A. Golikov, V. V. Golikov, Ya. Volyanskaya, O. Mazur, and O. Onishchenko, “A simple technique for identifying vessel model parameters,” *IOP*

Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 172, p. 012010, 2018. DOI: 10.1088/1755–1315/172/1/012010.

[24] M. L. Hakim et al., “Wind–Tunnel Experiments and CFD Simulations to Study the Increase in Ship Resistance Components Due to Roughness,” *J. Sustain. Sci. Manag.*, Apr. 2021.

[25] N. Hasanspahić, S. Vujičić, V. Frančić, and L. Campara, “The Role of the Human Factor in Marine Accidents,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, p. 261, 2021. DOI: 10.3390/jmse9030261.

[26] P. Hayes et al., “A Reassessment of Wind Speeds used for Intact Stability Analysis,” in *Proc. 12th Int. Conf. Stability Ships Ocean Vehicles*, Glasgow, UK, June 14–19, 2015, pp. 441–450.

[27] N. V. He, N. V. Hien, V.-T. Truong, and N.-T. Bui, “Effect between Hull and Accommodation on Wind Drag Acting on a Container Ship,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 11, p. 930, 2020. DOI: 10.3390/jmse8110930.

[28] J. P. Hooft and J. B. M. Pieffers, “Maneuverability of Frigates in Waves,” *Marine Technology*, vol. 25, pp. 262–271, 1988.

[29] Y. Huang, “Markov chain for future position estimation,” in *Proceedings of the International Conference on Computer Science and Applications*, 2018. DOI: 10.1007/978-1-4614-6312-2.

[30] International Maritime Organization, *Casualty Investigation Code*, London, 2008.

[31] International Maritime Organization, “International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW),” 2016. Online. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/STCW-Convention.aspx>. Accessed: Nov. 22, 2024.

[32] International Maritime Organization, “Casualty-related matters. Reports on marine casualties and incidents,” MSC-MEPC.3/Circ.3, 2008.

[33] International Maritime Organization, "Guidelines for the Onboard Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS)," Resolution A.915(22), Nov. 2001.

[34] International Maritime Organization, "Worldwide Radionavigation System," Resolution A.1046(27), Dec. 2011.

[35] S. Inoue, "A Practical Calculation Method of Ship Manoeuvring Motion," *International Shipbuilding Progress*, vol. 28, no. 325, pp. 207-217, 1981.

[36] R. M. Isherwood, "Wind Resistance of Merchant Ships," *The Royal Institution of Naval Architects*, vol. 115, pp. 327-338, 1972.

[37] W. D. Janssen, B. Blocken, and H. J. van Wijhe, "CFD simulations of wind loads on a container ship: Validation and impact of geometrical simplifications," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 166, pp. 106-116, 2017. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.03.015.

[38] Japan Transport Safety Board, "Marine Accident and Incident Reports, 2012-2019." Online. Available: <https://www.mlit.go.jp/jtsb/marrep.html>. Accessed: Nov. 22, 2024

[39] K. Kijima, S. Tanaka, Y. Furukawa, and T. Hori, "On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics," in *Proceedings of MARSIM-93*, vol. 1, pp. 285-294, 1993.

[40] K. Kijima, Y. Furukawa, and K. Yukawa, "On a prediction method of hydrodynamic forces acting on ship hull including the effect of hull form," in *Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*, Oct. 2021, pp. 411-418. DOI: 10.1201/9780203748077-51.

[41] Y. Kim, K. Kim, S. Jeong, S. Van Jeong, Y.-C. Kim, and J. Kim, "Design and Performance Evaluation of Superstructure Modification for Air Drag Reduction of a Container Ship," in *Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2015, pp. 894-901.

[42] N. Konon, “Analytical Modelling of Seakeeping Qualities of Container Vessel,” *Shipping & Navigation*, vol. 30, no. 1, pp. 78–87, Dec. 2020, DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.78-87.

[43] N. Konon, “Multi-vessel operation in maritime education and training,” in *Conference booklet “The green line of maritime business”*, Lithuanian Maritime Academy, Klaipeda, 14-16 September 2022, p. 14.

[44] N. Konon, “Prospects for Modern Maritime Education and Training Practices in Terms of Distance Learning,” *Shipping & Navigation*, vol. 33, no. 1, pp. 54–66, Dec. 2022, DOI: 10.31653/2306-5761.33.2022.54-66.

[45] N. Konon and V. Konon, “Risk Analysis of the Container Fleet in The Context of the Maritime Operations’ Safety Improvement,” *Shipping & Navigation*, vol. 34, no. 1, pp. 79–92, May 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.34.2023.79–92.

[46] V. Konon and N. Konon, “Application Perspective of Digital Neural Networks in the Context of Marine Technologies,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 16, No. 4, DOI:10.12716/1001.16.04.16, pp. 743–747, 2022.

[47] N. Konon and O. Pipchenko, “Analysis of Marine Accidents Involving Container Ships,” *Shipping & Navigation*, vol. 32, no. 1, pp. 46–55, Dec. 2021, DOI: 10.31653/2306–5761.32.2021.46–55.

[48] N. Konon and O. Pipchenko, “Enhancement of Ship Handling Techniques Along a Predetermined Trajectory,” *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, vol. 26–27, no. 1–2, pp. 29–43, Dec. 2023, DOI: 10.33815/2313–4763.2023.1–2.26–27.029–043.

[49] N. Konon, O. Pipchenko and Yu. Kazak, “Virtual Reality Application and Usability in the Context of Maritime Education and Training: Assessment and Perspectives,” in *Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference*, Palanga, Lithuania, October 04–06, 2023, Kaunas: Publishing House "Technologija", 2023, pp. 680–684, DOI: 10.5755/e01.2351–7034.2023.P2.

[50] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, "New Mathematical Models of the Thrust Coefficient and the Torque Coefficient on the Ship's Propeller Shaft," *Navigation Journal*, no. 35, pp. 1-15, 2023, DOI: 10.31653/2306-5761.35.2023.60-75.

[51] O. Kryvyi, M. V. Miyusov, and M. Kryvyi, "Construction and Analysis of New Mathematical Models of the Operation of Ship Propellers in Different Maneuvering Modes," *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 17, no. 1, pp. 95-102, 2023, DOI: 10.12716/1001.17.01.09.

[52] O. F. Kryvyi, M. V. Miyusov, and M. O. Kryvyi, "Mathematical modeling of the operation of ships' propellers with different maneuvering modes," *Navigation Journal*, no. 32, pp. 71-87, 2021, DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.71-87.

[53] Krzysztof, "Discrete Kalman filter for trajectory estimation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2017. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989239.

[54] K. Wróbel, "Searching for the origins of the myth: 80% human error impact on maritime safety," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 216, p. 107942, 2021. Online. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107942>.

[55] S. Lee, S. Lee, and S.-D. Kwon, "Effects of Topside Structures and Wind Profile on Wind Tunnel Testing of FPSO Vessel Models," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 6, p. 422, 2020. DOI: 10.3390/jmse8060422.

[56] R. Li, et al., "Clustering and LSTM for trajectory prediction," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019. DOI: 10.1109/TITS.2019.2901236.

[57] Y. Liu, et al., "Multi-sensor integration for Markov method accuracy," *IEEE Sensors Journal*, 2019a. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2901234.

[58] Y. Liu, et al., "SVM optimization with chaos evolution algorithm," *IEEE Access*, 2019b. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2901237.

[59] MAIB, "Accident report No 17/2008, September 2008. Report on the investigation of the loss of the tug Flying Phantom while towing Red Jasmine on the

River Clyde,” Transportation Safety Board of Canada, Mode Transportation Safety Investigation Report M09W0141, 2009.

[60] MAIB, “Accident report No 10/2016, May 2017. Girting and capsizing of mooring launch Asterix.”

[61] MAIB, “Accident report No 16/2017, July 2017. Capsizing of tug Domingue while assisting CMA CGM Simba resulting in two fatalities Tulear, Madagascar.”

[62] H. Majidian and F. Azarsina, “Numerical simulation of container ship in oblique winds to develop a wind resistance model based on statistical data,” *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, vol. 2, no. 2, pp. 67–88, 2019. DOI: 10.1080/25725084.2018.1564471.

[63] M. Maljković, I. Pavić, T. Meštrović, and M. Perković, “Ship Maneuvering in Shallow and Narrow Waters: Predictive Methods and Model Development,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 8, p. 1450, 2024. DOI: 10.3390/jmse12081450.

[64] *Maneuvering Information Booklet in Accordance With IMO Res.A 601(15), MSC Nela, 23,000 TEU Containership*, DSME, 2019.

[65] Marine Accident Investigation Branch, “Marine Accident and Incident Reports, 2012–2019.” Online. Available: <https://www.gov.uk/maib-reports>. Accessed: Nov. 22, 2024.

[66] F. Mauro, “Thrusters modelling for escort Tug capability predictions,” *Ocean Engineering*, vol. 229, p. 108967, 2021. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108967.

[67] F. Mazarella, et al., “Trajectory Prediction Using AIS Data via Bayesian Network and Particle Filter,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–10, 2015. DOI: 10.1109/TITS.2015.2402434.

[68] S. M. Mousaviraad, “CFD prediction of ship response to extreme winds and/or waves,” Ph.D. dissertation, University of Iowa, 2010.

[69] V. T. Nguyen, A. Kinugawa, N. Shimizu, and Y. Ikeda, “Studies on Air Resistance Reduction Methods for a Large Container Ship (Part 1),” in *Proceedings of the JASNAOE Annual Autumn Meeting*, 2016, pp. 427–432.

[70] V. T. Nguyen, N. Shimizu, A. Kinugawa, Y. Tai, and Y. Ikeda, “Numerical Studies on Air Resistance Reduction Methods for a Large Container Ship with Fully Loaded Deck-Containers in Oblique Winds,” in *Proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE 2017)*, 2017, pp. 1040–1051.

[71] H. Olszewski and H. Ghaemi, “New concept of numerical ship motion modelling for total ship operability analysis by integrating ship and environment under one overall system,” *Polish Maritime Research*, vol. 25, Special Issue S1 (97), pp. 36–41, 2018. DOI: 10.2478/pomr-2018-0020.

[72] K. Ouchi, Y. Tanaka, A. Taniguchi, J. Takashina, N. Matsubara, and K. Kimura, “A study on air drag reduction on the large container ship in the sea,” in *Proceedings of the International Conference on Design & Operation of Container Ships*, 2014, no. May, pp. 107–114.

[73] G. Pallotta, M. Vespe, and K. Bryan, “Traffic Route Extraction and Anomaly Detection,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 1–10, 2013. DOI: 10.1109/TITS.2013.2252423.

[74] G. Pallotta, M. Vespe, and K. Bryan, “Vessel Position Prediction Using the Ornstein–Uhlenbeck Stochastic Process,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–10, 2014. DOI: 10.1109/TITS.2014.2306972.

[75] D. Paroka, A. H. Muhammad, and S. Asri, “Steady state equilibrium of ships maneuvering under combined action of wind and wave,” *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. 76, no. 1, pp. 67–75, 2015. DOI: 10.11113/jt.v76.3809.

[76] D. Paroka, A. H. Muhammad, and S. Asri, “Maneuverability of Ships with Small Draught in Steady Wind,” *Makara Journal of Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 24–30, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7454/mst.v20i1.3052>.

- [77] V. Paulauskas, M. Simutis, B. Plačienė, R. Barzdžiukas, M. Jonkus, and D. Paulauskas, “The Influence of Port Tugs on Improving the Navigational Safety of the Port,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 3, p. 342, 2021. doi: 10.3390/jmse9030342.
- [78] M. Perković and M. Maljković, “Impact of Wind Forces on the Maneuverability of Large Container Ships,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 10, p. 1890, 2024. DOI: 10.3390/jmse12101890.
- [79] L. Perera and C. Soares, “Extended Kalman filter for future position estimation,” *Ocean Eng.*, 2010. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.07.004.
- [80] T. Perez, “A Review of Geometrical Aspects of Ship Motion in Maneuvering and Seakeeping, and the Use of a Consistent Notation,” MSS Technical Report MSS-TR001-2005, CeSOS, NTNU, Trondheim, Norway, 2005.
- [81] T. Perez and M. Blanke, “Simulation of Ship Motion in Seaway,” Technical Report, DTU Technical University of Denmark, 2015.
- [82] T. Perez and M. Blanke, “Mathematical Ship Modeling for Control Applications,” Technical Report, DTU Technical University of Denmark, 2003.
- [83] B. Piaggio, M. Viviani, M. Martelli, and M. Figari, “Z-Drive Escort Tug manoeuvrability model and simulation,” *Ocean Engineering*, vol. 191, p. 106461, 2019. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106461.
- [84] B. Piaggio, D. Villa, and M. Viviani, “Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics,” *Applied Ocean Research*, vol. 97, p. 102075, 2020. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102075.
- [85] B. Piaggio, D. Villa, M. Viviani, and M. Figari, “Numerical analysis of escort tug manoeuvrability characteristics – Part II: The skeg effect,” *Applied Ocean Research*, vol. 100, p. 102199, 2020. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102199.
- [86] B. Piaggio, M. Viviani, M. Martelli, and M. Figari, “Z-drive escort tug manoeuvrability modelling: From model-scale to full-scale validation,” in *Developments in Maritime Technology and Engineering*, 2021, pp. 207–216. DOI: 10.1201/9781003216599-23.

[87] B. Piaggio, M. Viviani, M. Martelli, and M. Figari, “Z-Drive Escort Tug manoeuvrability model and simulation, Part II: A full-scale validation,” *Ocean Engineering*, vol. 259, p. 111881, 2022. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111881.

[88] PIANC, *Harbour Approach Design Guidelines*, Report №121, 2014, 320 p.

[89] O. Pipchenko, “On the method of calculation of ship’s transverse stability in regular waves,” *Ships and Offshore Structures Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 9-18, 2009. doi: 10.1080/17445300802402579.

[90] O. Pipchenko, “Mathematical Modelling of Operation of The Tug Equipped With Azimuthal Thrusters,” *Shipbuilding*, no. 2, pp. 13-19, 2017. doi: 10.15589/jnn20170202.

[91] O. Pipchenko and N. Konon, “Involvement of modern technologies in the improvement of marine professional training methods,” *Збірник матеріалів VIII міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення»*, 19-20 квітня 2024 р., ДІ НУ «ОМА», Ізмаїл, С. 329–332.

[92] O. Pipchenko and N. Konon, “Improvement of marine professional training methods through the involvement of modern technologies,” *Shipping & Navigation*, vol. 35, no. 1, pp. 128–142, Dec. 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.35.2023.128–142.

[93] O. Pipchenko, N. Konon and Ye. Bogachenko. “Mathematical modelling of "ASD tug – marine vessel" interaction considering tug's maneuverability and stability limitations,” *Journal of Maritime Research*, vol. 20, no. 2, pp.117–124, August 2023, DOI: 10.5281/zenodo.8370780.

[94] O. Pipchenko and D. Kovtunencko, “A suggestion of an application of blended learning in MET through a harmonized STCW model,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 14, no. 3, pp. 545-548, 2020. doi: 10.12716/1001.14.03.04.

[95] O. Pipchenko and D. S. Zhukov, “Development of the Ship Dynamics Model on the Basis of an Artificial Neural Network,” in *Proceedings of the IAMU*, vol. 1, no. 5, pp. 23-31, Tokyo, Japan, 2007.

- [96] O. Pipchenko and V. Shevchenko, “Robust Automatic Ship Heading Controller For Various Conditions,” *Marine Intellectual Technologies – Scientific Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 208-214, 2018.
- [97] O. Pipchenko, M. Tsymbal, and V. Shevchenko, “Features of an Ultra-large Container Ship Mathematical Model Adjustment Based on the Results of Sea Trials,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 14, no. 1, pp. 163-170, 2020. doi: 10.12716/1001.14.01.20.
- [98] O. Pipchenko, M. Tsymbal, and V. Shevchenko, “Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 12, no. 3, pp. 567-571, 2018. doi: 10.12716/1001.12.03.17.
- [99] S. Popinet, M. Smith, and C. Stevens, “Experimental and numerical study of the turbulence characteristics of airflow around a research vessel,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 21, pp. 1575–1589, 2004.
- [100] J. Prpić-Oršić, M. Valčić, and Z. Čarija, “A Hybrid Wind Load Estimation Method for Container Ship Based on Computational Fluid Dynamics and Neural Networks,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 7, p. 539, 2020. DOI: 10.3390/jmse8070539.
- [101] K. R. Reddy, R. Toffoletto, and K. R. W. Jones, “Numerical simulation of ship airwake,” *Computers & Fluids*, vol. 29, pp. 451–465, 2000.
- [102] L. Redondo, R. Méndez, and L. Pérez-Rojas, “An indirect method implementing effect of the wind on moored ship experimental tests,” in *Proceedings of INVE-MEM*, 2016, pp. 341–355.
- [103] Y. Rong, et al., “Probabilistic Trajectory Prediction Using Gaussian Process Model,” *Journal of Navigation*, vol. 72, no. 5, pp. 1–10, 2019. DOI: 10.1017/S037346331900001X.
- [104] S. S. Sáenz, G. Diaz-Hernandez, L. Schweter, and P. Nordbeck, “Analysis of the Mooring Effects of Future Ultra-Large Container Vessels (ULCV) on

Port Infrastructures,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 4, p. 856, 2023. DOI: 10.3390/jmse11040856.

[105] D. Saredakis, A. Szpak, B. Birckhead, H. Keage, A. Rizzo, and T. Loetscher, “Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis,” *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 14, 2020. DOI: 10.3389/fnhum.2020.00096.

[106] S. G. Seo, “Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 10, no. 4, pp. 605-612, 2016. DOI: 10.12716/1001.10.04.09.

[107] Seok and J.-C. Park, “Comparative Study of Air Resistance with and without a Superstructure on a Container Ship Using Numerical Simulation,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 267, 2020. DOI: 10.3390/jmse8020267.

[108] V. Shigunov, “Assessment of Maneuverability in Waves,” *Journal of Ship Research*, vol. 63, no. 2, pp. 78–93, Jun. 2019. DOI: 10.5957/josr.09180048.

[109] F. Stern, et al., “CFD, Potential Flow, and System-Based Simulations of Course Keeping in Calm Water and Seakeeping in Regular Waves for 5415M,” presented at the NATO OTAN Conference, Oct. 2011.

[110] Suo, et al., “GRU neural network for computational efficiency,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020. DOI: 10.1109/TITS.2020.2901238.

[111] A. Sutulo, et al., “State transfer equation for kinematic models,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)00498-100498-1).

[112] S. Torre, M. Burlando, D. Ruscelli, M. P. Repetto, and G. Camauli, “Wind tunnel experimental investigation of the aerodynamic coefficients reduction due to sheltering surroundings on a cruise ship moored in port,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 218, p. 104731, 2021. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104731.

[113] M. Szymonski, “Some Effects of Wind on Ship’s Manoeuvrability,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 13, no. 3, pp. 623-626, 2019. DOI: 10.12716/1001.13.03.20.

[114] Tang, et al., “LSTM neural network for ship trajectory,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019. DOI: 10.1109/TITS.2019.2901235.

[115] The Shipowners’ Mutual Protection and Indemnity Association (Luxembourg), *Loss Prevention Booklet – Tug and Tows: A Practical Safety and Operational Guide*, 2015.

[116] T. Van Zwijnsvoorde, et al., “Wind Modelling for Large Container Vessels: a Critical Review of the Calculation Procedure,” *International Journal of Transport Development and Integration*, vol. 3, no. 4, pp. 369–381, 2019. DOI: 10.2495/TDI-V3-N4-369-381.

[117] Transportation Safety Board of Canada, “Mode Transportation Safety Investigation Report M18P0230,” 2018.

[118] Transportation Safety Board of Canada, “Mode Transportation Safety Investigation Report M19P0246,” 2020.

[119] W.-J. Tseng, J.-F. Ding, C.-M. Liu, and L.-Y. Li, “Risk Factors Influencing Harbor Tugboat Operations for Kaohsiung Port,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 354-364, 2021. DOI: 10.51400/2709-6998.1439.

[120] A. Turk and J. Prpić-Oršić, “Estimation of Extreme Wind Loads on Marine Objects,” *Brodogradnja*, vol. 60, no. 2, pp. 147–156, 2009.

[121] M. Ueno, F. Kitamura, N. Sogihara, and T. Fujiwara, “A Simple Method to Estimate Wind Loads on Ships,” presented at the 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM’12), Aug. 2012, pp. 2314–2322.

- [122] UNCTAD, *Review of Maritime Transport 2017*, 2017. Online. Available: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2017_en.pdf.
- [123] D. Vasiljević, J. Vasiljević, and B. Ribarić, “Artificial Neural Networks in Creating Intelligent Distance Learning Systems,” in *The 1st International Conference on Maritime Education and Development*, S. Bauk and S. D. Ilčev, Eds. Cham: Springer, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-64088-0_18.
- [124] D. Wan, I. Pavić, and T. Meštrović, “Hydrodynamic Performance of Large Container Ships in Confined Waters,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 9, p. 1678, 2024. DOI: 10.3390/jmse12091678.
- [125] S. Wang and Z. He, “A prediction model of vessel trajectory based on generative adversarial network,” *Journal of Navigation*, vol. 74, no. 5, pp. 1161–1171, Sep. 2021. DOI: 10.1017/S0373463321000382.
- [126] I. Watanabe, V. T. Nguyen, S. Miyake, N. Shimizu, and Y. Ikeda, “A Study on Reduction of Air Resistance acting on a Large Container Ship,” in *Proceedings of APHydro2016*, 2016, pp. 321–330.
- [127] J.-h. Won and Y. S. Kim, “A Study on Visually Induced VR Reduction Method for Virtual Reality Sickness,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 14, p. 6339, 2021. DOI: 10.3390/app11146339.
- [128] A. D. Wnek, A. Guedes Soares, X.-Q. Zhou, and C. Guedes Soares, “Numerical and Experimental Analysis of the Wind Forces Acting on LNG Carrier,” in *Proceedings of the V European Conference on Computational Fluid Dynamics*, Lisbon, Portugal, Jun. 2010.
- [129] T. Yamano and Y. Saito, “An Estimation Method of Wind Forces Acting on Ships,” *Journal of The Kansai Society of Naval Architects*, no. 228, pp. 91–100, 1997.
- [130] L. Yang, S.-S. Lee, and H. Sadakane, “Influence of Ship-Tugboat Interaction on the Braking Performance of Tugboat Based on Model Experiments,” *The Journal of Japan Institute of Navigation*, vol. 117, pp. 135–142, 2007. DOI: 10.9749/jin.117.135.

- [131] H. Yasukawa and Y. Yoshimura, “Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 20, pp. 37–52, 2015.
- [132] Y. Yin, et al., “A stacking model for vessel destination prediction,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022. DOI: 10.1109/TITS.2022.2901240.
- [133] K. Yoneta, S. Januma, and K. Karasuno, “Analysis of Vessels’ Wind Forces through the Utilization of a Physical-Mathematical Model II,” *Journal of Japan Institute of Navigation*, no. 86, pp. 169–177, 1992.
- [134] Y. Yoshimura and Y. Masumoto, “Hydrodynamic Force Database with Medium High Speed Merchant Ships Including Fishing Vessels and Investigation into a Manoeuvring Prediction Method,” *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, vol. 14, pp. 63–73, 2011. DOI: 10.2534/jjasnaoe.14.63.
- [135] Y. Yoshimura and Y. Masumoto, “Hydrodynamic database and manoeuvring prediction method with medium high-speed merchant ships and fishing vessels,” in *Proceedings of the International MARSIM Conference*, 2012, pp. 494–503.
- [136] R. Zárate-Miñano, F. Madia Mele, and F. Milano, “SDE-based Wind Speed Models with Weibull Distribution and Exponential Autocorrelation,” presented at the Conference, Jul. 2016.
- [137] W. Zhang, et al., “Hidden Markov model for state transition,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019. DOI: 10.1109/TITS.2019.2901234.
- [138] Z. Zhang, S. Hao, B. Wang, X. Bo, X. Zhang, and Y. Yu, “Research on Course-Changing Performance of a Large Ship with Spoiler Fins,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 11, p. 2059, 2024. DOI: 10.3390/jmse12112059.
- [139] W. Zhang, et al., “Trajectory similarity for destination prediction,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020. DOI: 10.1109/TITS.2020.2901239.

[140] L. Zhao and J. Shi, “Clustering AIS Trajectories Using Dynamic Time Warping and Douglas-Peucker Algorithm,” *Journal of Navigation*, vol. 72, no. 3, pp. 1–10, 2019. DOI: 10.1017/S037346331800088X.

[141] Y. Zhou, et al., “K-means Clustering for Ship Behavior Classification,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 1–10, 2019. DOI: 10.1007/s00773-019-00639-0.

[142] Y. Zhou, et al., “Impacts of wind and current on ship behaviour in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data,” *Ocean Engineering*, vol. 213, 2020.

[143] Л.Л. Вагущенко, Н.М. Цимбал, Системи автоматичного керування рухом судна. - 3-тє вид., перероб. та дод. – Одеса: Фенікс, 2007. – 328 с.

[144] Л.Л. Вагущенко, Сучасні інформаційні технології судноводіння [Електронний навчальний посібник]. Одеса: ОНМА, 2013. - 135 с.

[145] В. В. Голіков, С. Е. Мальцев, “Аналіз вектора усунення шляху судна від вітру,” Науковий вісник Херсонської державної морської академії, вип. 1(12), С. 29-35, 2015 .

[146] В. В. В. Голіков, С. Е. Мальцев, “ Алгоритм визначення положення полюса повороту при маневруванні,” *Збірник матеріалів науково–практичної конференції «Навігація: транспорт, технічні засоби, безпека», Одеса, Україна, лист. 2012 р., С. 106–110.*

[147] Н. М. Конон, “Аналіз аварійності контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково–практичної конференції “Проблеми сталого розвитку морської галузі PSDMI–2021”*, 3–5 листопада 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 45 – 48.

[148] Н. М. Конон, “Контроль навігаційної безпеки при проходженні Суецького каналу на прикладі аварії т/х «Ever Given»,” *Збірник матеріалів XIII міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті” (MINTT – 2021)*, 25-27 травня 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 118-121.

[149] Н. М. Конон, “Оцінка перспектив підвищення навігаційної безпеки великотоннажних контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково-технічної конференції “Судноводіння, морські технології та перевезення” (NST-2022)*, 17-18 листопада 2022 р., НУ «ОМА», Одеса, С. 165–169.

[150] Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами : пат. 157309 Україна : (2023.01) G01C 21/00, (2006.01) B63B 49/00. № и 2023 00148 ; заявл. 16.01.2023; опубл. 02.10.2024, Бюл. № 40/2024 (кн. 1). 170 с.

[151] В. Е. Львов, А. С. Мальцев, “Метод покращення компенсаційних властивостей системи управління курсом судна,” *Судноводіння: збірник наукових праць*, ОНМА, вип. 15, С. 99–103, 2008.

[152] А. С. Мальцев, В. В. Голіков, “Оптимізація програми задавачів з визначення маневрених характеристик судів,” *Судноводіння: збірник наукових праць*, ОНМА, вип. 15, С. 105–115, 2008.

[153] А. С. Мальцев, В. В. Голіков, І. В. Сафін, і В. В. Мамонтов, *Теорія маневрування рухомих об'єктів при надмірному зближенні*, Одеса: ОНМА, 2012, 555 с.

[154] А. С. Мальцев, *Теорія та практика безпечного управління судном при маневруванні* рукопис: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, Одеса, 2007, 395 с.

[155] С. Мальцев, В. Голіков, “Пристрій оцінки полюса повороту за тангенційними швидкостями кінцівок,” *Матеріали науково-технічної конференції «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві»*, Одеса, 18–19 листопада 2014, С. 173 – 177.

[156] О. Д. Піпченко, *Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач* рукопис: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, Одеса, 2021, 286 с.

ДОДАТОК А

Характеристики великотоннажного контейнеровозу

GENERAL DESCRIPTION

Ship's Particulars

Principal dimensions

Length Over All (LOA):	399.70 m
Length Between Perpendiculars (LBP):	383.10 m
Breadth (Molded):	61.00 m
Depth (Molded):	33.20 m
Designed draft (Molded):	14.50 m
Scantling draft (Molded):	16.50 m
Ballast draft(T_f / T_a):	5.17 / 10.92 m
Sea Trial draft(T_f / T_a):	4.46 / 10.80 m

Hull Coefficient (Scantling Draft / Ballast Draft)

- Block Coeff.	(Cb)	: 0.739 / 0.660
- Prismatic Coeff.	(Cp)	: 0.749 / 0.678
- Midship Section Area Coeff.	(Cm)	: 0.987 / 0.974
- Waterplan Area Coeff.	(Cw)	: 0.895 / 0.765

Tonnage

- Deadweight at Scantling Draft(Ext.)	:	228,111.0	Ton
- Displacement at Scantling Draft(Ext.)	:	292,979.2	Ton

Main Generator Engine

- Type :	MAN B&W 11G95ME-C9.5 × 1 set (Derated)
- MCR:	66,220 kW × 80.0 rpm
- NCR :	59,600 kW × 77.2 rpm

Propeller

- Type	: Fixed pitch propeller
- Number of blade	: 5
- Diameter	: 10.50 m
- Pitch (0.7R)	: 10056.9mm
- Rotation (Looking fore)	: Right handed
- Maker	: Mecklenburger Metallgus GmbH

Rudder

- Type and Number	: Full-spade
- Movable Area	: 115.01 m ²

Full Loaded Condition (T_f / T_a)	:	16.50 M / 16.50 M
Ballast Condition (T_f / T_a)	:	5.17 M / 10.92 M

ДОДАТОК Б
Характеристики буксиру ASD

MAIN DIMENSIONS

Length, o.a.	32.50 m
Length p.p.	27.89 m
Breadth.....	10.80 m
Depth moulded (min.).....	6.65 m
Frame spacing.....	0.60 m
Design draught	4.60 m
Deadweight design	abt. 260 ton
Cruising range	4000 nm
Steering force.....	abt. 100 tonnes @ 10 knots

TRIAL SPEED

Speed	abt. 14 knots
-------------	---------------

MACHINERY AND PROPULSION

Main Engines.....	2 x Wärtsilä 8L26
Output.....	2600 kW / 1000 rpm
Thrusters.....	2 x Wärtsilä CS275-S/WN-K with 2600 mm diameter HR-nozzle
Aux Genset.....	2 x Caterpillar C9
Output.....	200kWe / 1800 rpm

CLASS

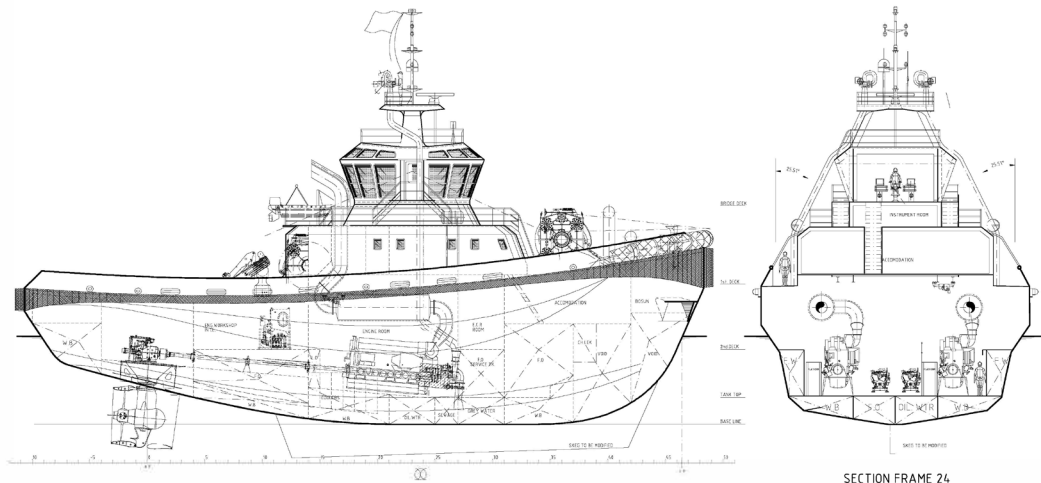
The vessel including the machinery and equipment shall be fully classed under e.g Det Norske Veritas with the notation +1A1, TUG, E0, Fire Fighting I, ESCORT.

ALTERNATIVE MACHINERY AND PROPULSION

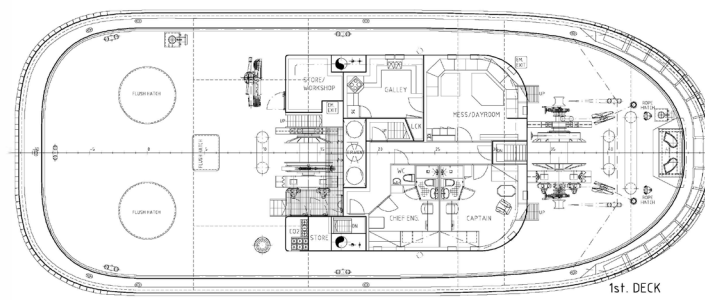
Main engines.....	2 x Wärtsilä 9L20
Output.....	1800 kW/ 1000 rpm
Thrusters.....	2 x Wärtsilä CS300-S/WN-K with 3000 mm diameter HR-nozzle
Motor (PTI).....	2 x 1000 kW / 1000 rpm
Propulsion genset	1 x Wärtsilä 6L20
Output.....	1140 kWe / 1000 rpm @ 50 Hz 1055 kWe / 900 rpm @ 60 Hz
Aux Genset.....	1 x Caterpillar C
Output.....	76 kWe / 1800 rpm

DECK EQUIPMENT

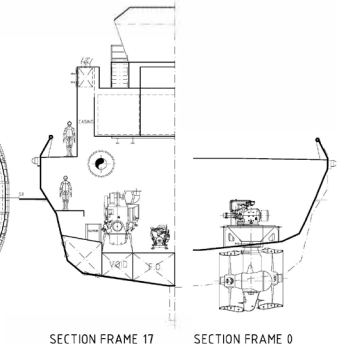
Towing/anchor winch forward with 2 x 200 m towing ropes	
Pulling force	112 ton (middle drum)
Holding brake	250 ton
Towing winch aft incl. spooling device with 1000 m wire	
Pulling force	91 ton (middle drum)
Holding brake	300 ton



SECTION FRAME 24

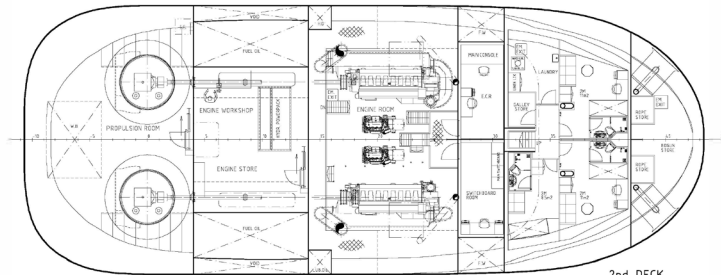


1st. DECK

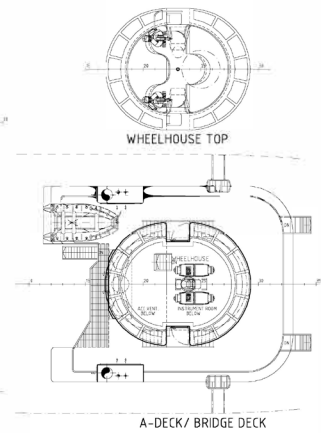


SECTION FRAME 17

SECTION FRAME 0

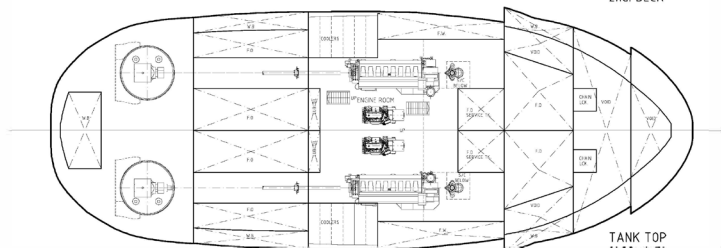


2nd. DECK



WHEELHOUSE TOP

A-DECK / BRIDGE DECK



TANK TOP
1400 ab.BL

PRINCIPAL PARTICULARS:

CAPACITIES

Class: DnV

+1A1, ESCORT, UNRESTRICTED, FI-FI 1: water spray.

A1 - BASIC PROP.CONFIG, BASIC BUFLT, THRUSTER UNITS CS275.

ДОДАТОК В

Акти впровадження результатів
дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
 Національного університету
 «Одеська морська академія»,
 к.т.н., професор



Вадим ЗАХАРЧЕНКО

2024 р.

А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи
 здобувачки Конон Наталії Миколаївни
 на тему «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів
 у портових акваторіях» в звіт науково-дослідної роботи № ДР 0123U1047412
 «Підвищення навігаційної безпеки морських перевезень у територіальному морі
 та внутрішніх морських водах України в інтересах агропромислового
 комплексу»

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини університету к.т.н., професор Савчук В.Д. та завідувач кафедри судноводіння к.т.н, доцент Сікірін В.Є. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Конон Н.М. на тему «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях» впроваджені в освітню компоненту «Дослідницький практикум», відповідно до освітньо-професійної програми другого (магістерського) рівня підготовки «Навігація і управління морськими суднами» навчально-наукового інституту навігації. Результати також відображені в звіті науково-дослідної роботи «Підвищення навігаційної безпеки морських перевезень у територіальному морі та внутрішніх морських водах України в інтересах агропромислового комплексу» (№ ДР 0123U1047412, Розділ 7 Розробка морського коридору у районі Дністровської банки для проходження великотоннажних суден, які виходять з портів Одеської затоки, в умовах воєнного стану).

Начальник науково-дослідної
 частини НУОМА,
 к.т.н., с.н.с., професор

Віктор САВЧУК

Завідувач кафедри
 судноводіння,
 к.т.н, доцент

Володимир СІКІРІН

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи
 здобувачки Конон Наталії Миколаївни
 на тему «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних
 контейнеровозів у портових акваторіях» в освітній процес
 Інституту післядипломної освіти
 «Центр підготовки та атестації плавскладу» НУОМА

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження Конон Н.М. на здобуття ступеню «доктор філософії» на тему «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях» впроваджені в освітній процес у якості складової практичної частини курсів підвищення кваліфікації судноводіїв в Інституті післядипломної освіти «Центр підготовки та атестації плавскладу» Національного університету «Одеська морська академія».

Директор

Інституту післядипломної освіти
 «Центр підготовки та атестації
 плавскладу» НУОМА



Віталій ПОНОМАРЕНКО

« 18 » 11 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного університету
«Одеська морська академія»,
д.т.н., професор



Олександр ШЕМЯКІН

2024р.

А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи
здобувачки Конон Наталії Миколаївни
на тему «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних
контейнеровозів у портових акваторіях» в освітній процес

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М.М., директор навчально-наукового інституту навігації, д.т.н., професор, к.д.п. Ворохобін І.І. та завідувач кафедри судноводіння, к.т.н, доцент Сікірін В.Є. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Конон Н.М. на здобуття ступеню «доктор філософії» впроваджені в освітній процес підготовки другого (магістерського) рівня вищої освіти у якості складової частини, тема «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях» також використовується у навчальному процесі кафедри судноводіння, в курсі лекцій по дисципліні «Математичні основи судноводіння».

Начальник навчального
відділу

Микола ПАРХОМЕНКО

Директор навчально-наукового
інституту навігації,
д.т.н., професор

Ігор ВОРОХОБІН

Завідувач кафедри
судноводіння,
к.т.н, доцент

Володимир СІКІРІН



LEARNMARINE

Professional maritime training provider

<https://learnmarine.com>

tel: +1 (831) 302-2334

e-mail: info@learnmarine.com

5900 Balcones Dr, Austin, TX, 78731, USA



CERTIFICATE OF IMPLEMENTATION

of the results of the dissertation work of Nataliia Konon
on the topic "Enhancing the safety of manoeuvring
large-tonnage container ships in port waters"
into the software of the Learnmarine LLC

This is to confirm that the results of the dissertation research of N.M. Konon for the degree of Doctor of Philosophy on the topic "Enhancing the safety of maneuvering large-tonnage container ships in port waters" have been implemented into the NavSimulator software of the Learnmarine LLC.

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження Конон Н.М. на здобуття наукового ступеня доктора філософії на тему: «Підвищення безпеки маневрування великотоннажних контейнеровозів у портових акваторіях» імплементовано в програмне забезпечення NavSimulator компанії Learnmarine LLC.

CEO

Learnmarine LLC

December, 9th 2024



O. Pipchenko

ДОДАТОК Г
Патент на корисну модель

**ПАТЕНТ****НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ****№ 157309****СУДНОВА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
ПРИ СПІЛЬНОМУ МАНЕВРУВАННІ З БУКСИРАМИ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
02.10.2024.

В.о. директора
Державної організації «Український
національний офіс інтелектуальної
власності та інновацій»

 І.В. Паренчук





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157309** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
G01C 21/00
B63B 49/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

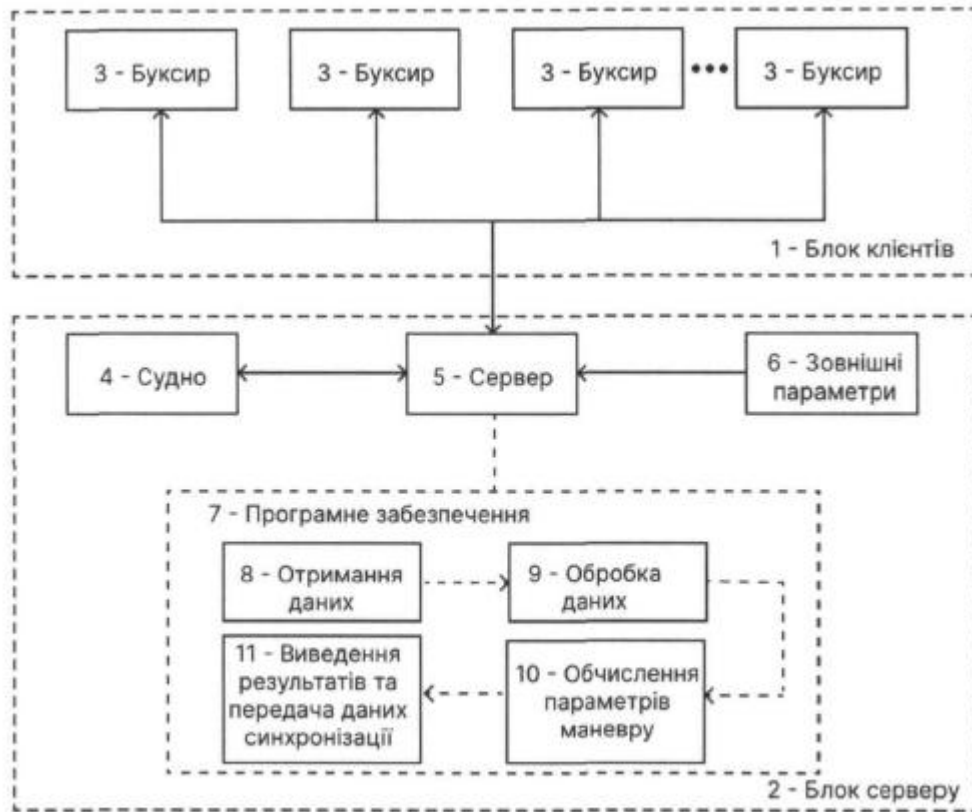
<p>(21) Номер заявки: u 2023 00148</p> <p>(22) Дата подання заявки: 16.01.2023</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 03.10.2024</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 02.10.2024, Бюл.№ 40</p>	<p>(72) Винахідник(и): Конон Наталія Миколаївна (UA), Піпченко Олександр Дмитрович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ", вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65052 (UA), Конон Наталія Миколаївна, Піпченко Олександр Дмитрович.</p>
---	---

(54) СУДНОВА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ СПІЛЬНОМУ МАНЕВРУВАННІ З БУКСИРАМИ

(57) Реферат:

Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами складається з блока клієнтів, який містить розміщені на буксирах модулі автоматичної ідентифікаційної системи, які дротовим та бездротовим зв'язками підключені до встановлених на буксирах обчислювальних пристроїв. Містить клієнтське програмне забезпечення, з алгоритмами обробки й обміну даних та приєднується до єдиної системи за архітектурою клієнт-сервер за допомогою супутникового і стільникового зв'язків через мережу Інтернет до сервера, що поєднаний із блоком зовнішніх параметрів. Містить серверне програмне забезпечення з алгоритмами та векторними картографічними даними офіційних видань, які встановлено на судовому обчислювальному пристрої, до якого безпосередньо дротовим та бездротовим зв'язками приєднується розташований на власному судні модуль автоматичної ідентифікаційної системи, а також містить блок зберігання навігаційних даних у пам'яті серверного обчислювального пристрою як додатковий ресурс електронних даних із режимом реєстратора даних рейсу.

UA 157309 U



Фіг. 1

Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами, що складається з блока клієнтів, який містить розміщені на буксирах модулі автоматичної ідентифікаційної системи, які дротовим та бездротовим зв'язками підключені до встановлених на буксирах обчислювальних пристроїв, містить клієнтське програмне забезпечення, з алгоритмами обробки й обміну даних, та приєднується до єдиної системи за архітектурою клієнт-сервер за допомогою супутникового і стільникового зв'язків через мережу Інтернет до сервера, що поєднаний із блоком зовнішніх параметрів, містить серверне програмне забезпечення з алгоритмами та векторними картографічними даними офіційних видань, які встановлено на судновому обчислювальному пристрої, до якого безпосередньо дротовим та бездротовим зв'язками приєднується розташований на власному судні модуль автоматичної ідентифікаційної системи, а також містить блок зберігання навігаційних даних у пам'яті серверного обчислювального пристрою як додатковий ресурс електронних даних із режимом реєстратора даних рейсу.

Корисна модель належить до засобів інформаційного забезпечення керування рухом судна при виконанні спільного маневрування судна разом із буксирами та використовується як засіб оцінки маневру системи "судно-буксири" в реальному часі, отримання відповідних рекомендацій для реалізації безпечного маневру та корегування параметрів виконуваного, базуючись на статичних й динамічних даних елементів системи "судно-буксири", отримуваних з суднового навігаційного обладнання. Аналоги заявнику не відомі.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалити існуючі суднові системи навігаційного містка, а саме створити пристрій для інформаційного забезпечення процесу керування судном під час спільного маневрування з буксирами шляхом імплементації комплексної обробки як динамічних даних руху судна й буксирів, так і відповідних статичних параметрів судна й буксирів (розміри, потужність пропульсивної установки тощо), для реалізації засобів забезпечення оператора (судноводія) інформацією щодо виконання спільного маневру системою "судно-буксири" в реальному часі, відповідної оцінки такого маневру, відповідних автоматизованих рекомендацій для безпеки маневрування, а також для надання свідчих даних при вирішуванні інцидентів на морі.

Поставлена задача вирішується тим, що суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами, що складається з блока клієнтів, який містить розміщені на буксирах модулі автоматичної ідентифікаційної системи, які дротовим та бездротовим зв'язками підключені до встановлених на буксирах обчислювальних пристроїв, містить клієнтське програмне забезпечення, з алгоритмами обробки й обміну даних та приєднується до єдиної системи за архітектурою клієнт-сервер за допомогою супутникового і стільникового зв'язків через мережу Інтернет до сервера, що поєднаний із блоком зовнішніх параметрів, містить серверне програмне забезпечення з алгоритмами та векторними картографічними даними офіційних видань, які встановлено на судновому обчислювальному пристрої, до якого безпосередньо дротовим та бездротовим зв'язками приєднується розташований на власному судні модуль автоматичної ідентифікаційної системи, а також містить блок зберігання навігаційних даних у пам'яті серверного обчислювального пристрою як додатковий ресурс електронних даних із режимом реєстратора даних рейсу.

Суть корисної моделі пояснюють креслення.

На фіг. 1 наведена загальна схема суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами, що містить блок клієнтів 1, з якого статичні та динамічні дані від авторизованих буксирів 3 передаються до сервера 5, що належить до блока сервера 2, та який, в свою чергу, отримує статичні та динамічні дані судна 4, а також дані щодо зовнішніх параметрів 6 (напрямок та швидкість вітру, течії, а також параметри хвилювання) та містить програмне забезпечення 7, що містить блок отримання даних 8, блок обробки даних 9, блок обчислення необхідних параметрів маневру для надання рекомендаційної інформації щодо керування судном лоцману та судновій команді містка при виконанні маневрових операцій 10, блок виведення результатів та передачі даних синхронізації 11. Обчислювальні пристрої, встановлені на буксирах, а також їх ПЗ належать до клієнтського блока корисної моделі 1. Обчислювальні пристрої, встановлені на судні, а також їх ПЗ, відповідно, належать до серверного блока 2. Клієнтські та серверні блоки взаємодіють один з одним за допомогою стільникової або супутникової передачі даних через мережу Інтернет.

На фіг. 2 наведена загальна схема обміну даними суднової системи підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами в рамках архітектури "клієнт-сервер", що складається з: блока клієнта - буксира 3 (кількість яких відповідає кількості залучених до маневрування буксирів), що містить AIC-модуль 12, що містить статичні та динамічні дані буксира (курс відносно землі, гірокомпасний курс, швидкість відносно води, швидкість відносно землі, координати, осадка тощо) та містить обчислювальний пристрій 13; сервера 5, що містить AIC-модуль 12, що містить статичні та динамічні дані судна (курс відносно землі, гірокомпасний курс, швидкість відносно води, швидкість відносно землі, координати, осадка тощо) та через який передаються дані від буксира, містить модуль зовнішніх параметрів 14 (напрямок та швидкість вітру, течії, а також параметри хвилювання), містить обчислювальний пристрій 15; блока даних у напрямку сервер-клієнт 16, враховуючи налаштування користувача, та містить дані щодо підключення пристроїв до мережі, синхронізації даних, рекомендованого зусилля (його величини й напрямку); блока даних у напрямку клієнт-сервер 17, враховуючи налаштування користувача, та містить дані щодо статусу авторизації буксира, а також дані буксира. Встановлені на буксирі апаратна та програмна складові належать до буксира 3 (клієнтського блока) й складаються з AIC-модуля 12 із дротовим (USB) і бездротовим (Wi-Fi) інтерфейсом та обчислювального пристрою 13, портативного комп'ютера чи планшета із встановленим відповідним програмним забезпеченням. Програмне забезпечення з боку клієнта

відповідає за авторизацію буксира у системі через відповідний інтерфейс клієнтського ПЗ, отримання наявної інформації з АІС-модуля; її відправку до сервера за допомогою стільникового або супутникового зв'язку через мережу Інтернет; отримання даних від сервера для синхронізації пристроїв. Встановлені на судні апаратна та програмна складові належать до сервера 5 й складаються з АІС-модуля 12 із дротовим (USB) і бездротовим (Wi-Fi) інтерфейсом та обчислювального пристрою 15, що на відміну від клієнтського блока, оснащений розширеним програмним забезпеченням. Програмне забезпечення сервера отримує дані від клієнтських модулів, обробляє їх відповідно до встановленої задачі та розсилає інформацію для перевірки синхронізації в зворотному напрямку (до користувачів) (фіг. 2). Також до складу моделі входить модуль налаштування зовнішніх параметрів 14 (вітер, течія, хвилювання). Даний модуль представлений у вигляді програмного додатка до програмного забезпечення сервера.

На фіг. 3 наведена діаграма загального алгоритму клієнтського програмного забезпечення: 18 - "Початок виконання програми"; 19 - "Отримання даних від АІС-модулю"; 20 - "Чи авторизований буксир у системі?"; 21 - "Очікування авторизації та виведення відповідного повідомлення на дисплей"; 22 - "Виведення відповідного повідомлення на дисплей і обмін даними із сервером"; 23 - "Чи отримана команда на завершення роботи?"; 24 - "Завершення програми".

На фіг. 4 наведена діаграма загального алгоритму серверного програмного забезпечення: 18 - "Початок виконання програми"; 25 - "Налаштування параметрів маршруту до точки призначення з використанням картографічної інформації. Первинне планування маневрування"; 26 - "Налаштування статичних параметрів судна та зовнішньої середовища (швидкість та напрямок вітру, течії й хвилювання). Отримання даних від суднового АІС-модулю"; 27 - "Чи відповідає кількість авторизованих буксирів до запланованої?"; 28 - "Виведення відповідного повідомлення на дисплей"; 29 - "Обмін даними між сервером та клієнтськими модулями, синхронізація"; 30 - "Розрахунок поточних параметрів руху системи з врахуванням поточних усіх вхідних даних"; 31 - "Оцінка відповідності поточних маневрів до запланованих"; 32 - "Чи досягли точки призначення?"; 33 - "Виведення поточних даних на дисплей"; 34 - "Виведення відповідного повідомлення на дисплей"; 35 - "Блок запису та збереження даних маневрування системи судно-буксири"; 36 - "Відправка команди до завершення програми на клієнтські пристрої"; 24 - "Завершення програми".

Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами працює наступним чином:

ПЗ сервера використовує картографічні дані з офіційних джерел, такі як векторні електронні карти, що постачає AVCS (Admiralty Vector Chart Service) та NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). В рамках корисної моделі, картографічні векторні дані необхідні для ідентифікації об'єктів в зоні маневрових операцій (навігаційні небезпеки), визначення відстаней до цих об'єктів та розрахунку необхідного зусилля (його величини й напрямку) для виконання безпечного маневру. Кожний етап процесу маневрування системи "судно-буксири", що отримується за результатами обчислень, супроводжується відповідними рекомендаційними коментарями для усіх учасників процесу на дисплеї серверного обчислювального пристрою. Поточна інформація щодо координат судна та зовнішніх факторів наведена в верхньому правому куті екрану.

Особливістю моделі є те, що через графічний інтерфейс ПЗ сервера користувач може виконувати: планування процесу маневрування з визначенням початкової та кінцевої точок з моменту авторизації (підключення) зазначеної кількості буксирів у системі; налаштування впливу зовнішніх факторів (вітру, течії, хвилювання тощо) з метою їх урахування при розрахунку необхідних зусиль та інших параметрів маневрування системи "судно-буксири"; під час маневру виконувати моніторинг за станом системи "судно-буксири" та отримувати рекомендації стосовно необхідних дій для кожного її учасника на дисплеї обчислювального пристрою, що базуються на відповідній статичній та динамічній інформації її відповідних елементів, що отримується в режимі "онлайн" чи налаштовується оператором попередньо.

Корисна модель передбачає початок контролю за рухом системи "судно-буксири" з моменту авторизації запланованої кількості буксирів через клієнтське ПЗ, із врахуванням вхідних даних від клієнтів-буксирів у реальному часі, та до досягнення системою "судно-буксири" кінцевої точки.

Після авторизації усіх запланованих буксирів в системі за допомогою підтвердження через графічний інтерфейс клієнтського ПЗ, відбувається обмін даними між клієнтськими модулями й сервером. ПЗ серверу виконує обчислення поточної ситуації й порівнює її із запланованим маршрутом маневрування, враховуючи встановлені зовнішні параметри, отримувані дані від власного АІС-модуля судна й від буксирів, із врахуванням їх статичних даних, що не входять до

інформаційного блока АІС (попередньо налаштовуються оператором), як максимальна потужність двигуна, параметри циркуляції й гальмування, потужність пристроїв підрулювання (за наявності), положення конструктивно призначених точок для роботи буксирів на корпусі судна тощо. Якщо поточний маневр відрізняється від запланованого, відповідне повідомлення відображується на дисплеї користувача із запропонуванням послідовності дій для виконання успішного та безпечного за результатами обчислення маневру. Така процедура повторюється до моменту досягнення кінцевої точки. Програма завершує свою роботу у разі досягнення кінцевої точки та надсилає відповідний сигнал клієнтському ПЗ, котре, в свою чергу, також завершує своє виконання.

Корисна модель передбачає, що дані маневрування за налаштуванням можуть зберігатися у пам'яті серверного обчислювального пристрою й використовуватись як додатковий ресурс для зберігання електронних даних до їх видалення користувачем або системою у режимі реєстратора даних рейсу (РДР).

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами, що складається з блока клієнтів, який містить розміщені на буксирах модулі автоматичної ідентифікаційної системи, які дротовим та бездротовим зв'язками підключені до встановлених на буксирах обчислювальних пристроїв, містить клієнтське програмне забезпечення, з алгоритмами обробки й обміну даних, та приєднується до єдиної системи за архітектурою клієнт-сервер за допомогою супутникового і стільникового зв'язків через мережу Інтернет до сервера, що поєднаний із блоком зовнішніх параметрів, містить серверне програмне забезпечення з алгоритмами та векторними картографічними даними офіційних видань, які встановлено на судновому обчислювальному пристрої, до якого безпосередньо дротовим та бездротовим зв'язками приєднується розташований на власному судні модуль автоматичної ідентифікаційної системи, а також містить блок зберігання навігаційних даних у пам'яті серверного обчислювального пристрою як додатковий ресурс електронних даних із режимом реєстратора даних рейсу.

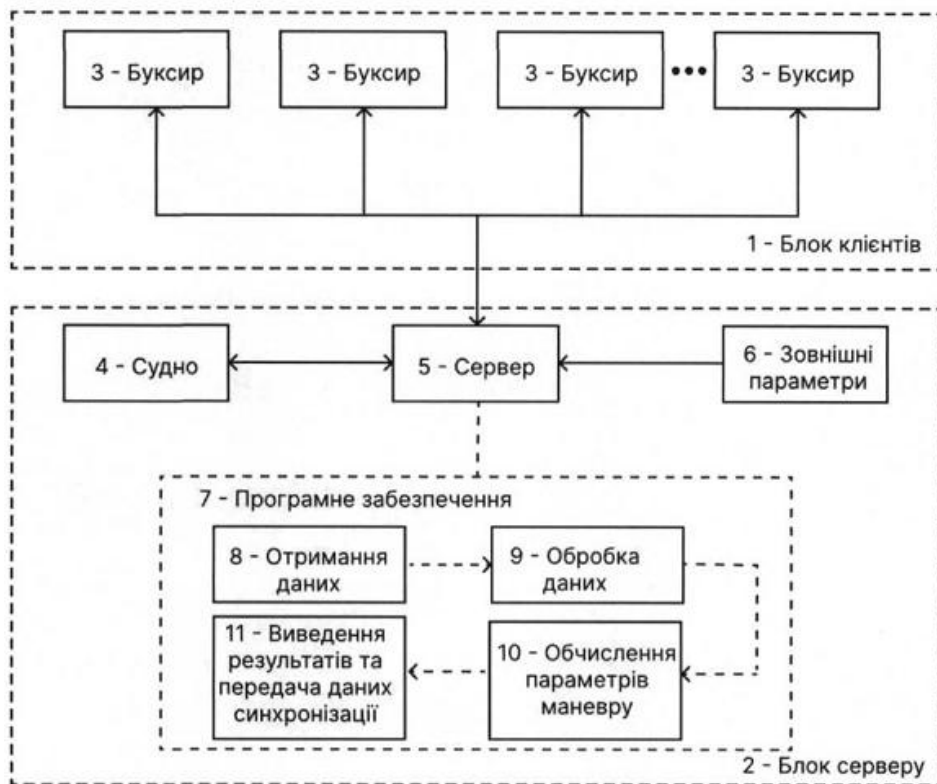


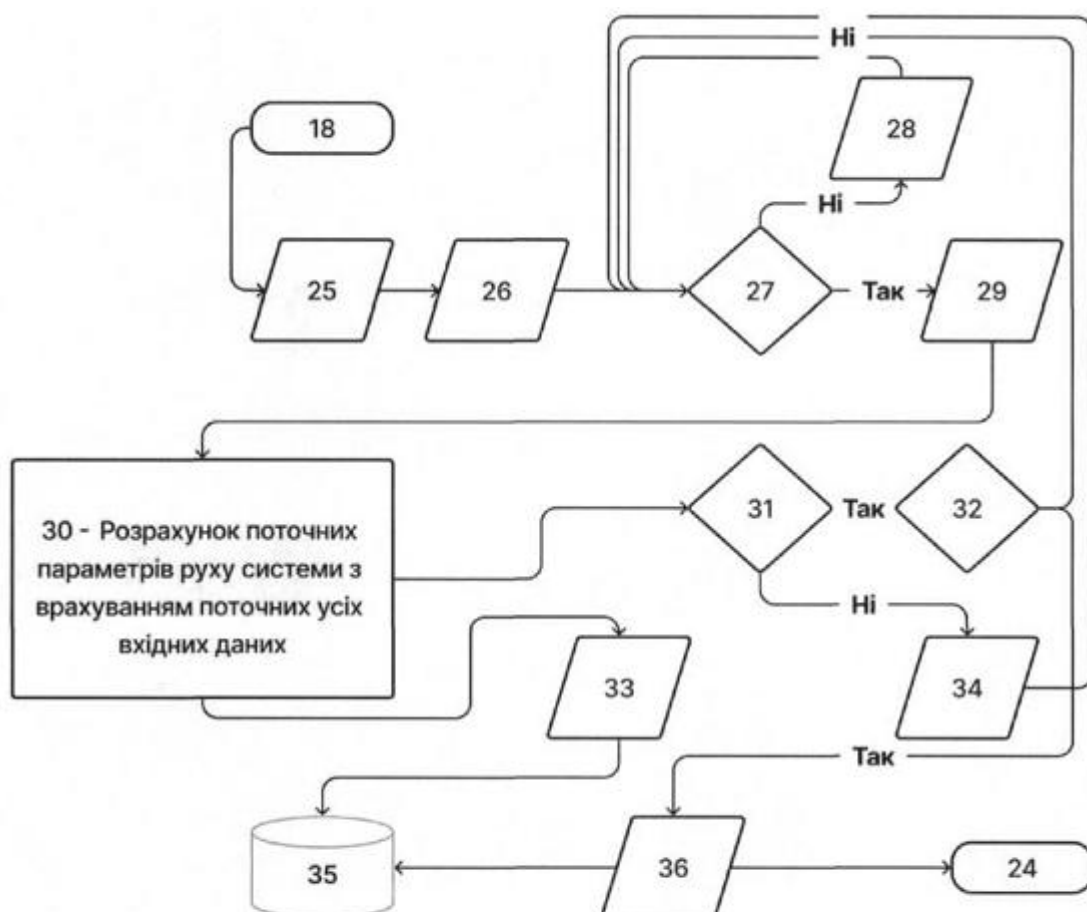
Fig. 1



Фіг. 2



Фіг. 3



Фіг. 4

ДОДАТОК Д

Список публікацій здобувачки та відомості
про апробацію результатів дисертації

Список публікацій здобувачки:

1. N. Konon, "Analytical Modelling of Seakeeping Qualities of Container Vessel," *Shipping & Navigation*, vol. 30, no. 1, pp. 78–87, Dec. 2020, DOI: 10.31653/2306–5761.30.2020.78–87.
2. O. Pipchenko, N. Konon and Ye. Bogachenko. "Mathematical modelling of "ASD tug – marine vessel" interaction considering tug's maneuverability and stability limitations," *Journal of Maritime Research*, vol. 20, no. 2, pp.117–124, August 2023, DOI: 10.5281/zenodo.8370780.
3. N. Konon and O. Pipchenko, "Enhancement of Ship Handling Techniques Along a Predetermined Trajectory," *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, vol. 26–27, no. 1–2, pp. 29–43, Dec. 2023, DOI: 10.33815/2313–4763.2023.1–2.26–27.029–043.
4. N. Konon and O. Pipchenko, "Analysis of Marine Accidents Involving Container Ships," *Shipping & Navigation*, vol. 32, no. 1, pp. 46–55, Dec. 2021, DOI: 10.31653/2306–5761.32.2021.46–55.
5. N. Konon, "Prospects for Modern Maritime Education and Training Practices in Terms of Distance Learning," *Shipping & Navigation*, vol. 33, no. 1, pp. 54–66, Dec. 2022, DOI: 10.31653/2306–5761.33.2022.54–66.
6. Н. Конон, В. Конон, "Аналіз ризиків притаманних контейнерному флоту у контексті підвищення безпеки морських операцій," *Shipping & Navigation*, vol. 34, no. 1, pp. 79–92, May 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.34.2023.79–92.
7. О. Піпченко, Н. Конон, "Удосконалення методів морської професійної підготовки шляхом залучення сучасних технологій," *Shipping & Navigation*, vol. 35, no. 1, pp. 128–142, Dec. 2023, DOI: 10.31653/2306–5761.35.2023.128–142.
8. N. Konon, O. Pipchenko and Yu. Kazak, "Virtual Reality Application and Usability in the Context of Maritime Education and Training: Assessment and Perspectives," in *Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International*

Scientific Conference, Palanga, Lithuania, October 04–06, 2023, Kaunas: Publishing House "Technologija", 2023, pp. 680–684, DOI: 10.5755/e01.2351–7034.2023.P2.

9. O. Pipchenko and N. Konon, “Involvement of modern technologies in the improvement of marine professional training methods,” *Збірник матеріалів VIII міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення»*, 19–20 квітня 2024 р., ДІ НУ «ОМА», Ізмаїл, С. 329–332.

10. Н. М. Конон, “Оцінка перспектив підвищення навігаційної безпеки великотоннажних контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково-технічної конференції “Судноводіння, морські технології та перевезення” (NST-2022)*, 17–18 листопада 2022 р., НУ «ОМА», Одеса, С. 165–169.

11. N. Konon, “Multi-vessel operation in maritime education and training,” *in Conference booklet “The green line of maritime business”*, Lithuanian Maritime Academy, Klaipeda, 14–16 September 2022, p. 14.

12. Н. М. Конон, “Аналіз аварійності контейнеровозів,” *Збірник матеріалів науково-практичної конференції “Проблеми сталого розвитку морської галузі PSDMI-2021”*, 3–5 листопада 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 45 – 48.

13. Н. М. Конон, “Контроль навігаційної безпеки при проходженні Суецького каналу на прикладі аварії т/х «Ever Given»,” *Збірник матеріалів XIII міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті” (MINTT – 2021)*, 25–27 травня 2021 р., ХДМА, Херсон, С. 118–121.

14. Суднова система підтримки прийняття рішень при спільному маневруванні з буксирами : пат. 157309 Україна : (2023.01) G01C 21/00, (2006.01) B63B 49/00. № и 2023 00148 ; заявл. 16.01.2023; опубл. 02.10.2024, Бюл. № 40/2024 (кн. 1). 170 с.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

Основні результати та положення дисертаційного дослідження доповідались, обговорювалися, були схвалені на ряді конференцій:

- Науково-технічній конференції “Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT – 2021” (ХДМА, Херсон, 25–27 травня 2021 р.);
- Науково-технічній конференції “Проблеми сталого розвитку морської галузі PSDMI–2021” (ХДМА, Херсон, 3–5 листопада 2021 р.);
- International Scientific Conference “The green line of maritime business” (Lithuanian Maritime Academy, Klaipeda, 14–16 September 2022);
- Науково-технічній конференції “Судноводіння, морські технології та перевезення NST-2022” (Одеса, 17–18 листопада 2022 р.);
- 27th International Scientific Conference Transport Means 2023 (Palanga, Lithuania, October 04 – 06, 2023);
- Міжнародній науково-практичній конференції “Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення” (Ізмаїл, 19–20 квітня 2024 р.).